PIANETI IMPROBABILI

Gli astronomi stanno individuando pianeti in luoghi del cosmo dove sembrava che la loro esistenza fosse impossibile

di Michael W. Werner e Michael A. Jura

Ron Miller

IN SINTESI

- La straordinaria diversità dei pianeti extrasolari è stata una sorpresa per gli astronomi. I più incredibili sono quelli che orbitano intorno a stelle di neutroni, nane bianche e nane brune: oggetti che a loro volta hanno dimensioni non molto superiori a quelle planetarie.
- Le stelle di neutroni sono prodotte nelle esplosioni di supernova, perciò con ogni probabilità i loro pianeti sono corpi di seconda generazione aggregati a partire dai resti dell'esplosione. I pianeti in orbita intorno alle nane bianche sono invece i superstiti della fine violenta di una stella di tipo solare.

Una delle immagini più tristi del cielo è quella di una nana bianca. Le caratteristiche della maggior parte delle stelle – colore, grandezza, luminosità – sono determinate dalla massa. Una nana bianca ha massa confrontabile con quella del Sole, eppure è tra le stelle meno brillanti, e col tempo è destinata a indebolirsi ulteriormente. Gli astronomi ritengono che in realtà sia l'ultimo resto di una stella di tipo solare che per circa 10 miliardi di anni ha avuto una luminosità paragonabile a quella del Sole. Quando però ha iniziato a esaurire il proprio combustibile nucleare è entrata in una turbolenta fase di agonia: in un primo momento si è rigonfiata fino ad assumere una grandezza anche 100 volte superiore, diventando 10.000 volte più brillante; poi ha espulso gli strati esterni e si è ridotta a un resto poco luminoso delle dimensioni della Terra. Per il resto dell'eternità rimarrà inerte, svanendo lentamente nell'oscurità.

Se questa storia vi sembra già abbastanza cupa, sappiate che il peggio deve ancora venire. Noi e alcuni colleghi abbiamo scoperto almeno una decina di nane bianche della nostra galassia intorno alle quali orbitano asteroidi, comete e forse anche pianeti: un vero e proprio cimitero di mondi. Quando queste stelle erano ancora in vita, sorgevano ogni giorno nel cielo di questi corpi, riscaldandone il suolo e alimentandone i venti. Forse organismi viventi ne godevano la luce. Ma alla morte della stella i pianeti interni sono stati vaporizzati o inghiottiti al suo interno, lasciando superstiti solo quelli che si trovavano nelle regioni più esterne e fredde del sistema. Col tempo la nana bianca ha distrutto e consumato molti dei sopravvissuti. Questi sistemi ci offrono un quadro davvero fosco della sorte che attende il sistema solare quando il Sole morirà.

Da lungo tempo gli astronomi pensavano che ci fossero pianeti in orbita intorno ad altre stelle. Si è sempre immaginato che i sistemi aventi nel centro una stella di tipo solare fossero molto simili al nostro; ma quando, a partire da 15 anni fa, le scoperte hanno cominciato a susseguirsi a ritmo frenetico, si è visto immediatamente che i sistemi planetari extrasolari possono differire in maniera nettissima dal sistema solare. Il primo esempio è stato quello di 51 Pegasi, una stella simile al Sole che ha un pianeta più massiccio di Giove in un'orbita più stretta di quella di Mercurio. L'aumento di sensibilità degli strumenti ha permesso di scoprire esempi ancora più strani. La stella di tipo solare HD40307 ha tre pianeti, di massa compresa tra 4 e 10 masse terrestri, tutti in orbite il cui raggio è inferiore alla metà di quello di Mercurio. Un'altra stella di tipo solare, 55 Cancri A, è circondata da non meno di cinque pianeti, con masse pari a 10-1000 masse terrestri e raggio dell'orbita compreso tra un decimo di quello di Mercurio e un valore circa uguale a quello di Giove. I sistemi planetari immaginati dalla fantascienza faticano a reggere il confronto.

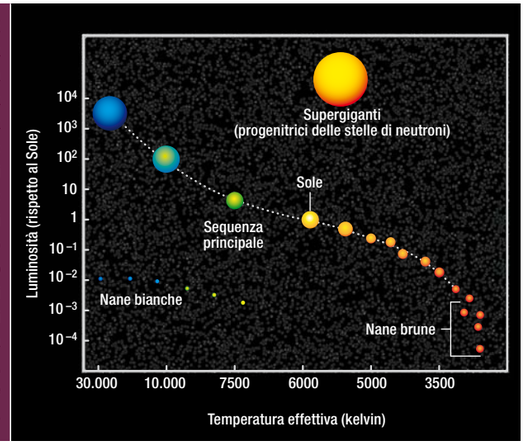
I sistemi nel cui centro si trova una nana bianca dimostrano che non è neppure necessario che la stella sia di tipo solare. C'è un vero e proprio zoo di pianeti in orbita intorno a corpi che a loro volta hanno dimensioni non superiori a quelle dei pianeti stessi; la varietà di questi sistemi non è da meno rispetto a quelli che hanno nel loro centro stelle ordinarie. Gli astronomi sono rimasti sorpresi dalla frequenza con cui si incontrano sistemi planetari, dalla loro «robustezza» e dall'evidente universalità dei processi che ne determinano la formazione. Nell'universo, i siti dove più comunemente si trovano pianeti, o addirittura forme di vita, potrebbero non assomigliare affatto al sistema solare.

La fenice risorge dalle ceneri

Sebbene oggi non lo si ricordi spesso, i primi pianeti extrasolari la cui scoperta sia stata confermata orbitano intorno a una stella molto diversa dal Sole: la stella di neutroni PSR 1257+12, un tipo di resto stellare estremamente compatto, con una massa superiore a quella solare racchiusa nel volume di un asteroide del diametro di una ventina di chilometri. L'evento che ha generato questo oggetto – l'esplosione di supernova di una stella di 20 masse solari – fu molto più violento della fine di una stella di tipo solare, ed è del tutto improbabile che eventuali pianeti abbiano potuto uscirne indenni. Quelli individuati devono essersi formati dalle ceneri dell'esplosione. In effetti, la stella probabilmente aveva un raggio superiore a 1 unità astronomica (UA, pari alla distanza Terra-Sole), e quindi più grande delle orbite dei pianeti identificati.

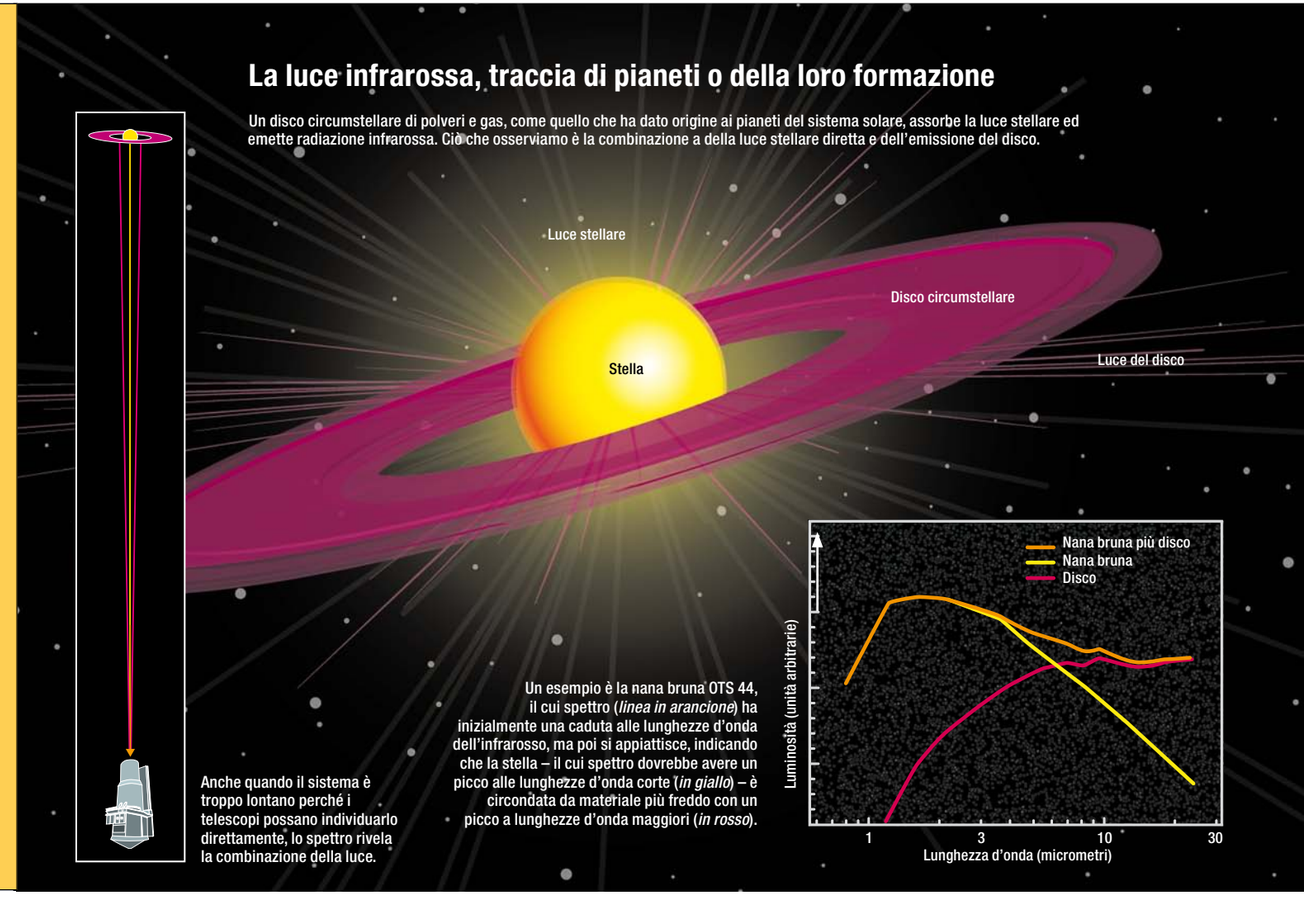
LE NANE BRUNE sono stelle troppo piccole – alcune hanno una massa di poco superiore rispetto a quella di Giove – per riuscire ad alimentare la fusione nucleare nel loro interno. Gli astronomi non si sono mai preoccupati di cercare pianeti intorno a questi corpi celesti; oggi, però, si rilevano indizi della formazione di sistemi solari in miniatura intorno a nane brune e ad altri corpi altrettanto improbabili.

LE STELLE ORDINARIE (che per temperatura e luminosità appartengono alla cosiddetta sequenza principale) sono sempre state ritenute le migliori candidate ad avere sistemi planetari analoghi a quello solare. Ma ora si stanno scoprendo pianeti anche intorno a oggetti al di fuori della sequenza principale, come le nane bianche e le nane brune.



Un bagliore nel buio

In genere gli astronomi individuano i pianeti per via indiretta, grazie ai loro effetti su velocità, posizione e luminosità delle stelle intorno alle quali orbitano. Nella maggior parte dei casi l'indizio determinante è di tipo indiretto: la presenza di un disco di polvere intorno alla stella. Un disco protoplanetario – il sito dove si ritiene avvenga la formazione di pianeti – circonda le stelle neonate; viceversa, un disco formato da detriti è rilevabile intorno a stelle mature, e presumibilmente è il prodotto di collisioni o dell'evaporazione di comete e asteroidi, perciò segnala la probabile esistenza di pianeti, oggi o in passato.
È possibile identificare i dischi dal modo in cui assorbono la luce stellare e riemettono l'energia assorbita nell'infrarosso (*a destra*). Lo Spitzer Space Telescope, lanciato nel 2003, è lo strumento ideale per scoprire dischi circumstellari. Le sue fotocamere grandangolari sono in grado di riprendere centinaia di stelle in una sola immagine e di evidenziare quelle che mostrano indizi della possibile presenza di dischi.
Spitzer sfrutta l'esperienza dei precedenti telescopi per l'infrarosso, come l'Infrared Astronomical Satellite (IRAS), degli anni ottanta, e l'Infrared Space Observatory (ISO) dell'Agenzia spaziale europea, a metà degli anni novanta. Spitzer esegue studi intensivi mirati su specifici corpi celesti e la durata prevista del suo refrigerante a base di elio liquido, superiore a cinque anni, è maggiore di quella di tutte le precedenti missioni. Il telescopio ha condotto studi sugli oggetti più disparati, dai pianeti extrasolari alle galassie dell'universo primordiale.
Il refrigerante sta per esaurirsi, e fra breve il telescopio comincerà a riscaldarsi, passando da una temperatura vicina allo zero assoluto a circa 30 kelvin, ma sarà in grado di compiere osservazioni nell'infrarosso vicino almeno fino a metà del 2011. Il suo posto sarà preso dallo Herschel Space Observatory, recentemente lanciato, e dal James Webb Space Telescope, il cui lancio è previsto per il 2013.



Russ Underwood/Lockheed Martin Space Systems (*Spitzer*); Melissa Thomas (*illustrazioni*)

Sebbene le supernove tipicamente espellano la maggior parte della propria materia nello spazio interstellare, una piccola quantità rimane gravitazionalmente legata e forma un disco rotante intorno al resto stellare. Dischi di questo tipo sono i luoghi dove avviene la formazione di pianeti. Gli astronomi ritengono che il sistema solare abbia preso forma quando una nube interstellare amorfa di gas e polveri collassò per effetto del proprio peso. La conservazione del momento angolare impedì a una parte della materia di cadere semplicemente nel Sole neonato; invece essa formò una struttura a forma di frittella. Nell'interno di questo disco, gas e polvere si aggregarono in pianeti. Un processo più o meno analogo può essere avvenuto nel disco formatosi per la ricaduta di una parte della materia dopo un'esplosione di supernova.

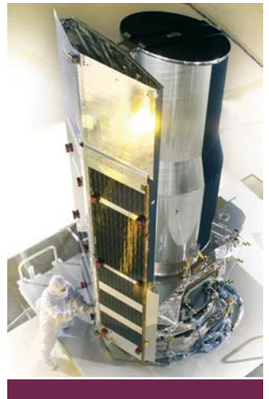
Il sistema intorno a PSR 1257+12 è stato scoperto rilevando anomalie periodiche nell'intervallo tra gli impulsi radio che emette; queste perturbazioni sono dovute all'influenza gravitazionale esercitata sulla stella dai pianeti in orbita, che ne modifica periodicamente la posizione e quindi fa variare la distanza che gli impulsi devono percorrere. Nonostante le ricerche condotte su altre stelle che emettono impulsi radio, non si conoscono sistemi confrontabili. Un'altra pulsar, PSR B1620–26, ha almeno un pianeta, che però è così lontano da essa da far ritenere che non si sia formato da un disco di materia ricaduta dopo l'esplosione, ma sia stato strappato gravitazionalmente a un'altra stella.

Nel 2006, però, lo Spitzer Space Telescope della NASA ha scoperto un'inattesa emissione infrarossa proveniente dalla stella di neutroni 4U0142+61. La radiazione potrebbe essere prodotta dalla magnetosfera della stella o da un disco circumstellare. Questo oggetto è stato generato da un'esplosione di supernova avvenuta circa 100.000 anni fa e, dato che di norma occorre circa un milione di anni perché si verifichi l'aggregazione di pianeti, se la radiazione segnala effettivamente la presenza di un disco un giorno questo sistema potrebbe assomigliare a quello in orbita intorno a PSR 1257+12.

Asteroidi per dessert

Anche molte nane bianche hanno dischi, ma di tipo un po' diverso, che indicano l'effettiva presenza di corpi orbitanti anziché condizioni tali da permetterne la formazione. Come nel caso di 4U0142+61, l'indizio è costituito da un'imprevista emissione di radiazione infrarossa. La scoperta risale al 1987, allorché l'Infrared Telescope Facility sulla vetta del Mauna Kea, ad Hawaii, rilevò un eccesso di emissione infrarossa da parte della nana bianca G29–38. Lo spettro corrispondeva a quello di un corpo con una temperatura di 1200 kelvin, molto inferiore a quella della stella, che è di circa 12.000. Inizialmente si pensò che una seconda stella, molto più fredda, fosse in orbita intorno alla nana. Nel 1990, però, si dimostrò che l'emissione nell'infrarosso aveva variazioni coincidenti con quelle della luminosità stellare, indicando che si trattava di radiazione stellare riflessa o alterata. La spiegazione più plausibile è costituita da un disco circumstellare riscaldato dalla nana bianca.

Quest'ultima ha un'altra proprietà peculiare. I suoi strati esterni contengono elementi pesanti come calcio e ferro: è strano, perché il campo gravitazionale alla superficie di una nana bianca è così intenso che questi elementi dovrebbero affondare nell'interno. Nel 2003 Jura propose una spiegazione sia dell'eccesso di emissione infrarossa sia della presenza di elementi pesanti: di recente la nana bianca ha distrutto un asteroide che si era avventurato nel suo campo gravitazionale. Una cascata di collisioni ha ridotto i resti del corpo in polvere, che forma il disco orbitante e ricade sulla stella.



LO SPITZER SPACE TELESCOPE, in fase di costruzione nella foto, è il corrispondente nell'infrarosso dell'Hubble Space Telescope.

Le osservazioni hanno confermato questo scenario. Usando i telescopi a terra e lo Spitzer Space Telescope, sono state identificate circa 15 nane bianche che presentano un eccesso di emissione infrarossa e anomalie della composizione. Nel caso di G29–38 e di sette altre stelle, Spitzer è addirittura riuscito a identificare l'emissione nell'infrarosso di silicati presenti nel disco. Questi composti sono simili a quelli delle particelle di polvere del sistema solare e differiscono notevolmente dalla polvere nello spazio interstellare. Inoltre, sebbene gli strati esterni di queste stelle contengano elementi pesanti, essi non sono presenti in quantità uguali: quelli volatili, come carbonio e sodio, sono relativamente scarsi in confronto agli elementi che tendono a rimanere in forma solida, come silicio, ferro e magnesio. Una simile composizione corrisponde a quella degli asteroidi e dei pianeti rocciosi del sistema solare. E i due risultati confermano che i dischi possano essere i resti polverizzati di asteroidi.

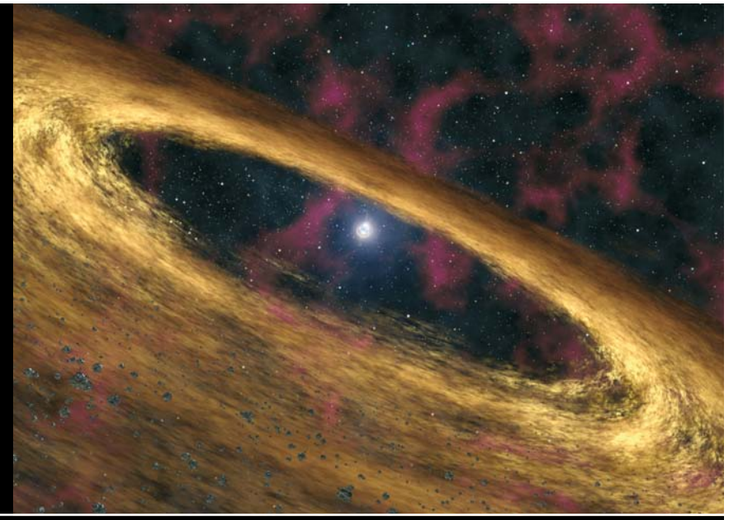
GLI AUTORI

MICHAEL W. WERNER è *project scientist* dello Spitzer Space Telescope e responsabile scientifico per l'astronomia e la fisica del Jet Propulsion Laboratory del Caltech. Si occupa di astronomia dell'infrarosso da oltre 35 anni, studiando i processi di formazione stellare, il mezzo interstellare e le regioni centrali della nostra galassia. MICHAEL A. JURA è professore di astronomia all'Università della California a Los Angeles. I suoi interessi di ricerca riguardano l'astrofisica degli ambienti freddi a bassa densità e i sistemi planetari extrasolari.

NASA/JPL-Caltech (*Werner*); cortesia Michael A. Jura (*Jura*); Melissa Thomas (*grafico*)

Pianeti e stelle di neutroni

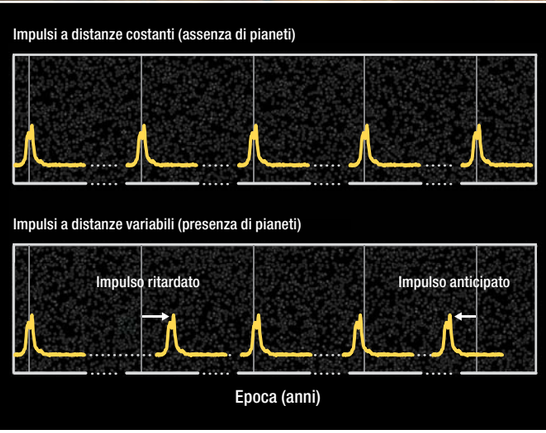
Le stelle di neutroni sono probabilmente gli oggetti più strani e sorprendenti intorno ai quali siano stati individuati sistemi planetari. La stella di neutroni 4U0142+61, che è il resto di un'esplosione di supernova avvenuta circa 100.000 anni fa, è immersa in un disco di detriti stellari che probabilmente si stanno aggregando in protopianeti (*blocchi grigi nell'illustrazione a destra*). È quasi certo che anche PSR 1215+12 abbia pianeti. I tempi di arrivo dei suoi impulsi radio presentano lievi oscillazioni (*in basso a destra*), indicative del fatto che la stella è perturbata da tre pianeti orbitanti intorno a essa (*in basso a sinistra*).



STELLA DI NEUTRONI + DISCO
Nome del sistema: 4U0142+61
Età del sistema: 100.000 anni
Raggio stellare: 10 chilometri
Raggio del disco: 1 UA

Un'altra stella di neutroni, PSR 1257+12, è probabilmente circondata da pianeti. Gli impulsi radio che emette mostrano lievi oscillazioni nei tempi di arrivo (*a destra*), indizio della presenza di tre pianeti intorno a essa (*sotto*).

STELLA DI NEUTRONI + PIANETI
Nome del sistema: PSR 1215+12
Età del sistema: 800 milioni di anni
Raggio stellare: 10 chilometri
Raggio delle orbite planetarie:
0,19, 0,36, 0,46 UA
Masse planetarie:
0,02, 4,3, 3,9 masse terrestri



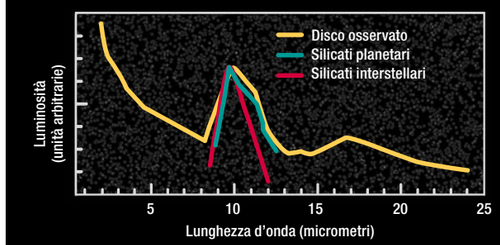
I dischi individuati intorno alle nane bianche sono molto più piccoli di quelli che circondano le stelle di tipo solare appena nate e che possono dare origine a pianeti. Dall'emissione nell'infrarosso si può valutare che si estendono solo per circa 0,01 UA, e presumibilmente non sono più massicci di un asteroide del diametro di una trentina di chilometri: l'osservazione concorda con l'ipotesi che la loro origine sia dovuta alla disintegrazione di un simile corpo. Non si tratta quindi di siti dove potrebbero formarsi nuovi pianeti, ma indicano che una parte del materiale planetario è sopravvissuta alla fine della stella progenitrice della nana bianca. Calcoli teorici mostrano che asteroidi e pianeti di tipo terrestre possono uscire indenni da un simile evento se il raggio della loro orbita è superiore a 1 UA. Quando il Sole morirà, per esempio, Marte dovrebbe salvarsi, mentre la sorte della Terra è più incerta.

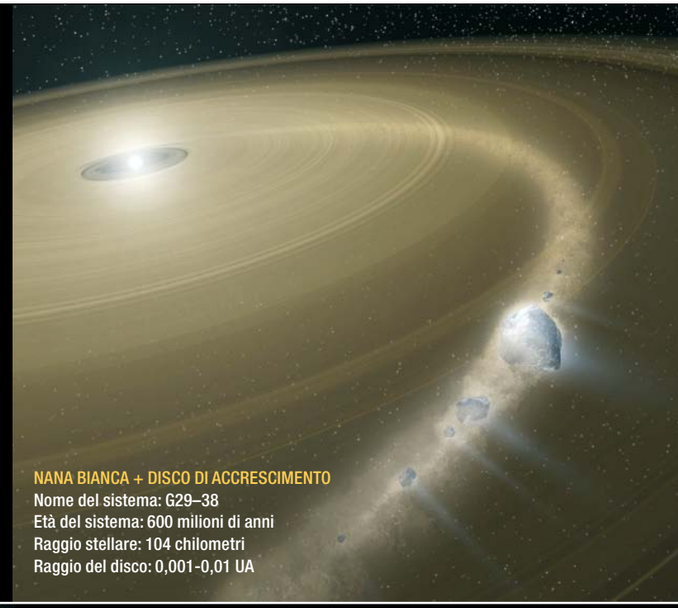
Un'indicazione di come un sistema planetario possa parzialmente sopravvivere è data dalla nana bianca WD2226–210. È così giovane che gli strati esterni della sua progenitrice, una stella di tipo solare, sono ancora visibili: si tratta della Nebulosa Elica, una delle nebulose planetarie più note. Di conseguenza WD2226–210 rappresenta l'anello mancante tra le stelle di tipo solare e le nane bianche più antiche, come G29–38. È circondata da un disco di polvere la cui estensione, di 100 UA, è confrontabile con la scala del sistema solare e molto superiore rispetto a quella rilevata per i dischi intorno ad altre nane bianche: troppo, anzi, perché il disco possa essere costituito da asteroidi distrutti dalla gravità della stella. Esso deve invece essere formato dalla polvere prodotta da collisioni tra asteroidi e comete. Dischi analoghi esistono intorno al Sole e ad altre stelle di tipo solare.

NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, Spitzer Science Center

Pianeti e nane bianche

Sono state individuate diverse nane bianche circondate da dischi di materia, probabilmente formati dai resti di un asteroide. In alcuni dischi, come quello della nana bianca GD40, è stata rilevata la particolare firma dei silicati. In effetti, lo spettro rilevato coincide con quello dei silicati planetari (*curva in verde nel grafico sotto a destra*) – i costituenti di molte rocce della Terra – anziché con quello dei silicati interstellari (*curva in rosso*). Questo e altri indizi fanno pensare che un tempo il sistema fosse popolato da pianeti, alcuni dei quali potrebbero esistere ancora oggi nelle sue zone più esterne e invisibili.





NANA BIANCA + DISCO DI ACCRESCIMENTO
Nome del sistema: G29–38
Età del sistema: 600 milioni di anni
Raggio stellare: 104 chilometri
Raggio del disco: 0,001-0,01 UA

Il punto rosso nel centro dell'immagine infrarossa della Nebulosa Elica è un disco che circonda una nana bianca. Esso è probabilmente costituito dai detriti di collisioni tra asteroidi e comete. Perciò almeno alcuni dei corpi del sistema uscirono indenni dal tumultuoso processo di formazione della nana bianca, avvenuto 11.000 anni fa.

NANA BIANCA + DISCO DI DETRITI
Nome del sistema: WD2226-10 (Nebulosa Elica)
Età del sistema: 10.000 anni
Raggio stellare: 104 chilometri
Raggio del disco: 100 UA

NASA/JPL-Caltech/T. Pyle Spitzer Science Center (*in alto*);
NASA/JPL-Caltech/K. Su, Università dell'Arizona (*in basso*); Melissa Thomas (*grafico*)

Pertanto, quando morì la stella progenitrice di WD2226–210, almeno alcuni asteroidi e comete si trovavano abbastanza lontano per salvarsi. E anche eventuali pianeti (che sono comunque corpi più robusti) potrebbero essere sopravvissuti. Via via che la nana bianca invecchia, la sua emissione luminosa diminuisce, e le regioni lontane del disco di polvere diventano invisibili. Tuttavia continuano a rappresentare una fonte di asteroidi, che possono avvicinarsi troppo alla stella e finire polverizzati.

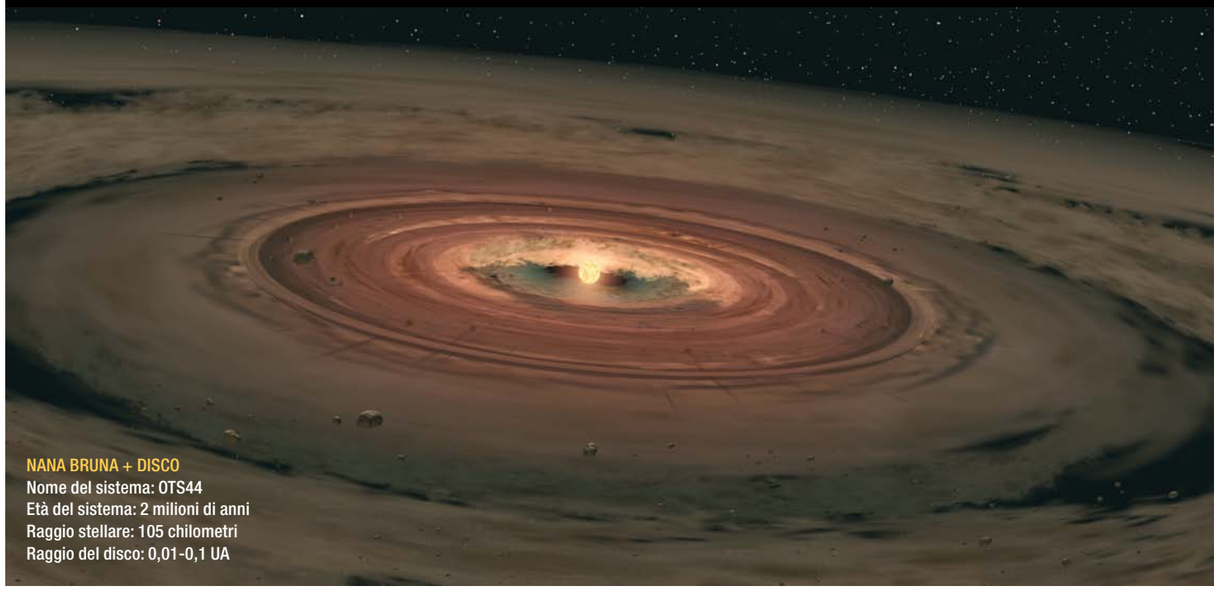
Piccole stelle

Una terza categoria di stelle non di tipo solare che potrebbero avere pianeti è costituita dalle nane brune, oggetti di dimensioni inferiore a quelle minime perché una stella brilli. Si sono formate come le stelle vere e proprie ma, avendo una massa inferiore all'8 per cento circa della massa solare, il loro nucleo non ha mai potuto raggiungere la temperatura e la densità necessarie per l'ignizione di una fusione nucleare sostenuta. Riescono a emettere appena un debole bagliore nell'infrarosso, irradiando il calore accumulato nel corso della loro formazione. Negli ultimi 15 anni le ricognizioni astronomiche hanno permesso di individuare centinaia di nane brune, la più leggera delle quali è a malapena più massiccia di una pianeta gigante.

Si è scoperto che questi corpi, anche i più piccoli, possono avere dischi e forse addirittura pianeti. La possibilità dell'esistenza di pianeti è confortata da osservazioni che mostrano come i dischi delle nane brune siano soggetti a variazioni sistematiche – tra cui una riduzione dell'intensità dell'emissione infrarossa dei silicati – attribuibili all'aggregazione di particelle di polvere. Le stesse variazioni avvengono nei dischi che circondano stelle più grandi, e

Il sistema di una nana bruna

Molte nane brune sono circondate da dischi che potrebbero essere siti di formazione di pianeti. Una di esse è OTS44, che ha un'età di circa 2 milioni di anni: esattamente l'arco temporale nel quale si ritiene abbiano cominciato a prendere forma i pianeti del sistema solare. Il disco contiene materia sufficiente per generare un pianeta di massa simile a Urano o a Nettuno. Il fatto che sia possibile la formazione planetaria in ambienti estremi come lo spazio circostante una nana bruna, una nana bianca o una stella di neutroni indica che il processo è decisamente più robusto di quanto si ritenesse.



NANA BRUNA + DISCO
Nome del sistema: OTS44
Età del sistema: 2 milioni di anni
Raggio stellare: 105 chilometri
Raggio del disco: 0,01-0,1 UA

NASA/JPL-Caltech/T. Pyle, Spitzer Science Center

segnalano l'accrescimento di protopianeti. I dischi sono troppo esigui per consentire la formazione di pianeti come Giove, ma più che sufficienti per un corpo della taglia di Urano o Nettuno. Alcuni astronomi hanno annunciato la scoperta di pianeti intorno a nane brune, ma finora nessuna di queste osservazioni è stata definitivamente confermata.

Per riassumere, si sono scoperti pianeti intorno ad almeno una stella di neutroni; asteroidi e comete orbitanti intorno a oltre una decina di nane bianche; e indizi delle prime fasi di formazione planetaria nei dischi che circondano alcune nane brune. Lo studio di questi e di altri sistemi planetari extrasolari si pone due obiettivi: in primo luogo si spera di approfondire le conoscenze sul sistema solare, in particolare sulla sua evoluzione, informazioni difficili da ottenere dalla nostra limitata prospettiva spaziale e temporale. Il secondo è quello di porre in contesto il sistema solare. È tipico o è un'eccezione? Nonostante la diversità dei sistemi planetari, la loro formazione si svolge secondo modalità comuni? La somiglianza tra la composizione degli asteroidi del sistema solare e quella della materia ricaduta sulle nane bianche fa pensare che la risposta a questa seconda domanda sia affermativa.

Un altro obiettivo è determinare quanto possa essere comune la vita nell'universo. Nel nostro vicinato galattico, le nane brune sono all'incirca altrettanto numerose delle stelle. La «stella» più vicina al Sole potrebbe allora essere una nana bruna non ancora scoperta? E i pianeti più prossimi potrebbero orbitare intorno a uno di questi corpi? Il Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), che la NASA prevede di lanciare verso la fine dell'anno, potrebbe individuare diverse nane brune a distanze inferiori rispetto alla stella nota più vicina.

L'esistenza di pianeti terrestri intorno a questi corpi potrebbe non solo estendere la varietà dei possibili habitat, ma anche far pensare che le più vicine forme di vita extraterrestre vedano sorgere nel cielo al mattino una nana bruna. Così pure, la presenza di asteroidi e comete intorno alle nane bianche fa pensare non solo che anche corpi di dimensioni planetarie possano sopravvivere alla fine di una stella di tipo solare, ma che eventuali organismi viventi, se riuscissero ad adattarsi alle mutate condizioni, possano proseguire la loro esistenza nell'ambiente che circonda queste stelle defunte. Se così fosse, le nane bianche ci offrirebbero uno spettacolo tutt'altro che triste. ■

➥ Letture

The Chemical Composition of an Extrasolar Minor Planet. Zuckerman B. e altri, in «Astrophysical Journal», Vol. 671, n. 1, pp. 872-877, 10 dicembre 2007. Consultabile on line all'indirizzo **arxiv.org/abs/0708.0198**.

Externally Polluted White Dwarfs with Dust Disks. Jura M., Farihi J. e Zuckerman B., in «Astrophysical Journal», Vol. 663, n. 2, pp. 1285-1290, 10 luglio 2007. Consultabile on line all'indirizzo **arxiv.org/abs/0704.1170.**

First Fruits of the Spitzer Space Telescope: Galactic and Solar System Studies. Werner M., Fazio G., Rieke G., Roellig T.L. e Watson D.M., in «Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics», Vol. 44, pp. 269-321, 2006. Consultabile on line all'indirizzo **arxiv.org/abs/astro-ph/0606563.**

Trovare pianeti non basta

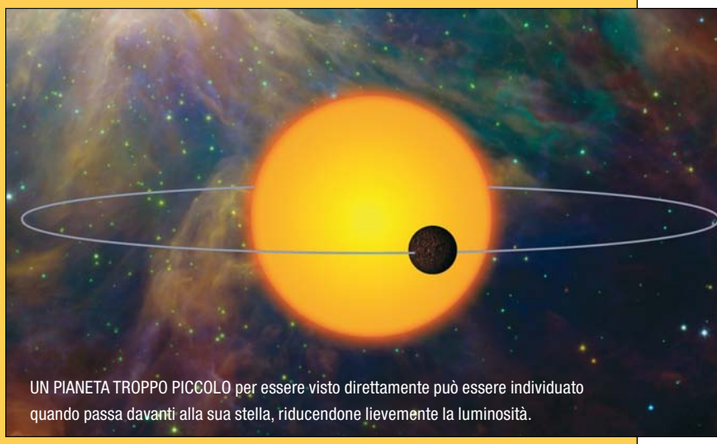
Gli astronomi sono sul punto di individuare altre Terre, ma stabilire se siano abitabili è molto più difficile

di Donald Goldsmith

Il 6 marzo scorso il telescopio spaziale Kepler della NASA ha iniziato una missione per individuare pianeti di tipo terrestre nella Via Lattea. Come il suo predecessore COROT, una missione diretta da studiosi francesi che ha avuto inizio nel 2006, Kepler osserverà un gruppo predeterminato di stelle per individuarne riduzioni temporanee della luminosità. Un offuscamento presumibilmente non ha significato, essendo probabilmente dovuto a una momentanea anomalia dell'emissione stellare; un secondo offuscamento può ancora essere relativamente insignificante; un terzo, avvenuto dopo lo stesso intervallo di tempo trascorso tra i primi due, comincia ad apparire interessante; e un quarto, sempre dopo un intervallo identico, segnala la presenza quasi certa di un pianeta la cui orbita passa esattamente tra noi e la stella. Ogni volta che il pianeta compie un transito di fronte alla stella, ne intercetta parzialmente la luce; un corpo di dimensioni simili a quelle della Terra riduce la luminosità di una parte su 10.000.

Nei primi mesi di quest'anno COROT ha individuato un pianeta di diametro circa doppio della Terra, in un'orbita così stretta che impiega solo 20 ore per compiere una rivoluzione. Kepler, che ha uno specchio 3,5 volte più ampio, dovrebbe identificare decine o centinaia di pianeti di tipo terrestre in orbita intorno alla loro stella a una distanza più confortevole. La maggior parte delle ricerche condotte finora, basate sul rilevamento della lieve attrazione gravitazionale esercitata dal pianeta sulla stella, non può identificare corpi di dimensioni così piccole. Lo svantaggio di COROT e Kepler è che le orbite planetarie devono essere allineate con la nostra linea di vista, e considerazioni probabilistiche limitano i casi fortunati a circa 1 su 100; ciò nonostante, Kepler potrà generare un campione statisticamente valido di cugini galattici della Terra.

Ma anche se questo obiettivo sarà raggiunto non potremo rispondere alla domanda più importante: quali condizioni ci sono su quei pianeti? Sono adatti alla vita? Quando un gigante gassoso transita di fronte alla sua stella, è possibile analizzarne l'atmosfera misurando l'entità dell'offuscamento a diverse lunghezze d'onda. Ma i pianeti di dimensioni terrestri sono troppo piccoli per applicare questa tecnica. Perciò la tecnologia di COROT e Kepler è in grado di individuare altre Terre, ma non può dirci molto su di esse. Questi strumenti non possono rilevare indizi della presenza di forme di vita, come il caratteristico colore della clorofilla o dei suoi equivalenti alieni. Anche la Space Interferometry Mission (SIM), il cui lancio potrebbe avvenire verso il 2015, potrà rivelare poco sui pianeti di tipo terrestre che individuerà. Per disporre di strumenti capaci di valutare l'abitabilità dei pianeti occorreranno tempi più lunghi, soprattutto a causa dei costi proibitivi. Il Terrestrial Planet Finder (TPF) della NASA e la missione Darwin della European Space Agency potranno realizzare misurazioni spettroscopiche della superficie e dell'atmosfera di pianeti extrasolari, ma finora nessuna delle due missioni ha superato la fase di studio progettuale. Anche se le due agenzie unissero le risorse disponibili, il costo dell'impresa ammonterebbe a circa 2 miliardi di dollari, e la costruzione richiederebbe un decennio. Per ora le migliori possibilità di avere informazioni sui pianeti extrasolari sono offerte dal James Webb Space Telescope (JWST), il cui lancio è previsto per il 2013, e dalla prossima generazione di telescopi con base a terra (si veda l'articolo *I telescopi del futuro*, di Roberto Gilmozzi, in «Le Scienze» n. 456, agosto 2006). Sebbene non siano stati progettati specificamente per l'analisi di pianeti, questi strumenti saranno muniti di coronografi che bloccheranno la luce stellare, permettendo di vedere eventuali piccoli corpi nascosti dal bagliore intenso. Questi strumenti potrebbero fornire immagini di giovani giganti gassosi intorno ad alcune delle stelle più vicine. E potrebbero ottenere informazioni spettroscopiche su oggetti in orbita stretta.



UN PIANETA TROPPO PICCOLO per essere visto direttamente può essere individuato quando passa davanti alla sua stella, riducendone lievemente la luminosità.

Ron Miller

In definitiva i prossimi anni, grazie ai risultati delle missioni COROT e Kepler, saranno probabilmente entusiasmanti, ma saranno seguiti da un periodo di frustrazione durante il quale si potranno solo immaginare le future scoperte. Non c'è nulla di insolito in questo: le conoscenze scientifiche progrediscono in maniera incrementale. Se si otterranno risultati positivi vi sarà un notevole impulso al finanziamento di nuovi osservatori con base nello spazio. La ricerca di pianeti in ambienti estremi, come i dintorni di stelle di neutroni, nane bianche e nane brune, dimostra quanto sia robusto il processo di formazione planetaria (*si veda il corpo dell'articolo*). Ma dobbiamo prepararci a una lunga lotta per scoprire quale sia il posto del nostro pianeta nel cosmo.

Donald Goldsmith è autore del libro 400 Years of the Telescope *(Interstellar Media Productions, 2009) e collabora a diversi programmi televisivi di argomento astronomico.*

NEL CERVELLO UMANO, l'emisfero sinistro controlla il linguaggio, l'abilità manuale destra, la capacità di classificare e il comportamento ordinario. L'emisfero destro è specializzato per la reazione alle emergenze, l'organizzazione spaziale, il riconoscimento dei volti e l'elaborazione delle emozioni.

L'evoluzione del cervello asimmetrico

La divisione del lavoro nei due emisferi cerebrali, che si pensava esclusiva dell'uomo e che controlla tra l'altro l'uso della parola, risale ad almeno mezzo miliardo di anni fa, quando hanno avuto origine i primi vertebrati

di Peter F. MacNeilage, Lesley J. Rogers e Giorgio Vallortigara

IN SINTESI

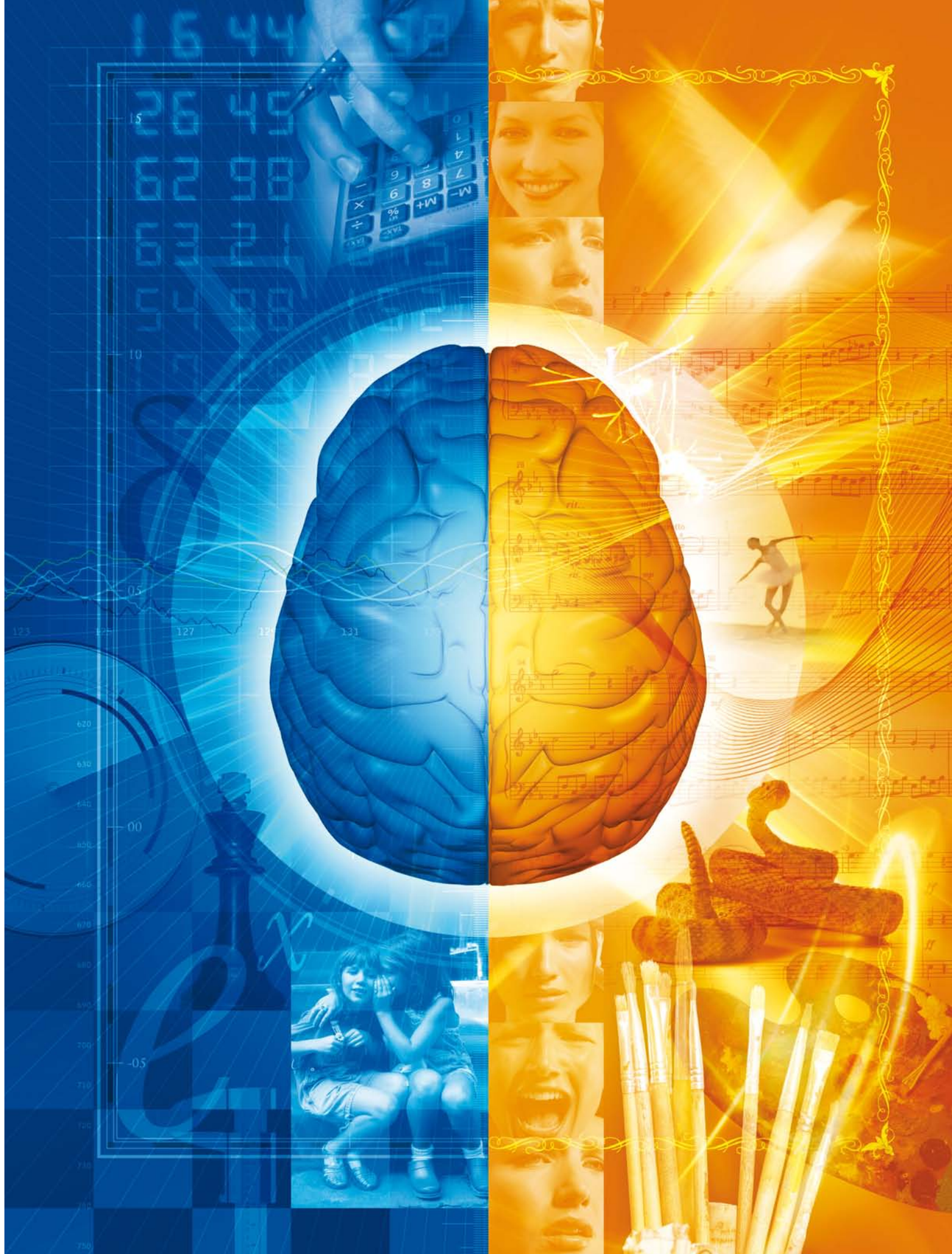
- Secondo gli autori, la specializzazione dei due emisferi del cervello esisteva già 500 milioni di anni fa, quando hanno avuto origine i vertebrati.
- Sembra che in origine l'emisfero sinistro si sia concentrato sul controllo di comportamenti consolidati, e l'emisfero destro si sia specializzato nel rilevare e rispondere a stimoli inattesi.
- Forse, la parola e la lateralità destra si sono evolute da una specializzazione per il controllo di un comportamento ordinario.
- Il riconoscimento dei volti e l'elaborazione di relazioni spaziali potrebbero risalire alla necessità di percepire con rapidità i predatori.

L'emisfero sinistro del cervello umano controlla il linguaggio, probabilmente una delle facoltà mentali più importanti, e anche l'abilità manuale destra. Invece l'emisfero destro è dominante, per esempio, nel controllo della percezione delle relazioni fra oggetti nello spazio. Quarant'anni fa la scienza sosteneva che, oltre al linguaggio, la lateralità manuale e la specializzazione di un solo emisfero per l'elaborazione delle relazioni spaziali fossero esclusive della nostra specie, una teoria rinforzata dall'idea che gli altri animali fossero privi di specializzazioni legate agli emisferi.

Quelle convinzioni si sposavano con l'idea che l'uomo occupi un posto privilegiato nell'evoluzione. Biologi e studiosi del comportamento erano d'accordo sul fatto che la lateralità manuale si fosse evoluta nei nostri antenati ominidi circa 2,5 milioni di anni fa, quando impararono a costruire e usare strumenti. E si pensava che la lateralità destra presiedesse all'uso della parola. Forse, così si diceva, l'emisfero sinistro ha aggiunto il linguaggio dei segni al suo repertorio di azioni manuali esperte, che ha poi convertito nella parola. O forse la sua capacità di controllare l'azione manuale si è estesa al controllo dell'apparato vocale. In entrambi i casi, parola e linguaggio si sarebbero evoluti da un talento relativamente recente nella costruzione degli oggetti. Allo stesso tempo, si pensava che l'emisfero destro si fosse evoluto in modo predeterminato come centro di elaborazione delle relazioni spaziali, dopo che l'emisfero sinistro si era specializzato nella lateralità manuale.

Da qualche decennio a questa parte però gli studi su molte altre specie animali hanno mostrato che i loro due emisferi cerebrali svolgono ruoli distinti. Eppure, nonostante queste scoperte, persiste l'idea che l'uomo sia differente. Molti ricercatori continuano a pensare che le specializzazioni scoperte recentemente in specie non umane sarebbero prive di relazione con la nostra specie; che le specializzazioni emisferiche degli esseri umani abbiano avuto inizio proprio con gli esseri umani.

Qui presenteremo le prove a favore di un'ipotesi radicalmente diversa, sempre più condivisa, specie dai biologi. Noi pensiamo che la specializzazione di ciascun emisfero del cervello umano fosse



Fotoillustrazione di Twist Creative; MedicalRF.com/Corbis (*cervello*); Medioimages/Getty Images (*calcolatrice*); Joerg Steffens/Corbis (*facce*); Westend61/Corbis (*donna che sorride*); Dougal Waters/Getty Images (*ballerina*); Mike Kemp/Getty Images (*serpente a sonagli*); C Squared Studios/Getty Images (*tavolozza*); Vladimir Godnik/Getty Images (*pennelli*); Carrie Boretz/Corbis (*bambine*); Robert Llewellyn/Corbis (*calibri*)

già presente nella sua forma essenziale circa 500 milioni di anni fa, quando emersero i vertebrati. E ipotizziamo che le specializzazioni più recenti degli emisferi cerebrali, comprese le specializzazioni umane, si siano evolute da quelle originarie per discendenza con modificazioni, come insegna Darwin. (In quel processo, capacità utili per tratti ancestrali sono state modificate o adattate al servizio di nuovi tratti che si stavano sviluppando.) Riteniamo anche che l'emisfero sinistro dei vertebrati fosse originariamente specializzato nel controllo di schemi di comportamento consolidati in condizioni comuni e familiari, e che l'emisfero destro, sede primaria delle emozioni, fosse inizialmente specializzato nella scoperta di stimoli inattesi e nella risposta a questi stimoli.

Nei vertebrati primitivi, questa divisione del lavoro ebbe inizio quando uno dei due emisferi sviluppò la tendenza ad assumere il controllo in particolari circostanze. Da quel semplice inizio l'emisfero destro prese il controllo primario in circostanze potenzialmente pericolose, che richiedevano all'animale una reazione rapida: trovare una preda nelle vicinanze, per esempio; altrimenti il controllo passava all'emisfero sinistro. Quest'ultimo è diventato, cioè, la sede del comportamento motivato dal sé, definito a volte controllo dall'alto (*top-down*). (Il comportamento motivato dal sé non è per forza innato; anzi, il più delle volte è appreso.) L'emisfero destro divenne la sede del comportamento motivato dall'ambiente, detto anche controllo dal basso (*bottom-up*). Il controllo di comportamenti più specializzati – linguaggio, creazione di strumenti, direzione e orientamento spaziali, riconoscimento dei volti e altro – si è evoluto a partire da questi due controlli di base.

L'emisfero sinistro

Le prove a sostegno della nostra ipotesi derivano non tanto dall'osservazione diretta del cervello, quanto da quella di comportamenti che favoriscono l'uno o l'altro lato del corpo. Nel sistema nervoso dei vertebrati le connessioni tra corpo e cervello si incrociano, ovvero i nervi diretti o provenienti da un lato del corpo sono quasi sempre collegati all'emisfero opposto del cervello.

Le prove a favore della prima parte della nostra ipotesi – l'emisfero sinistro dei vertebrati è specializzato nel controllo di comportamenti ordinari, diretti dall'interno – si sono accumulate nel tempo. Quello alimentare è un comportamento ordinario con una prevalenza all'emisfero destro in molte specie di vertebrati: pesci e rospi, per esempio, colpiscono la preda soprattutto dal lato destro, guidati dall'occhio destro e dall'emisfero sinistro (*si veda il box a p. 52*). In diverse specie di uccelli (polli, piccioni, quaglie e trampolieri) l'occhio destro guida vari tipi di beccaggio del cibo e la cattura della preda. In un caso questa preferenza lateralizzata nell'alimentazione ha causato un'asimmetria, anch'essa lateralizzata, dell'aspetto anatomico dell'animale: il beccostorto della Nuova Zelanda (*Anarhynchus frontalis*) ha il becco deviato verso destra, così il suo occhio destro guida il becco quando l'uccello cerca il cibo sotto i sassi di fiume.

Animali di tutte e cinque le classi di vertebrati mostrano una preferenza per l'emisfero destro nel comportamento alimentare

NELL'UOMO E IN ALTRI VERTEBRATI i nervi provenienti da, e diretti verso, un lato del corpo sono collegati all'emisfero cerebrale opposto, o controlaterale. Come risultato, ciascun emisfero controlla in prevalenza il lato opposto del corpo.

Andrew Swift

Quanto ai mammiferi, il comportamento alimentare delle megattere illustra la preferenza laterale nel comportamento alimentare. Phillip J. Clapham, dell'Alaska Fisheries Science Center di Seattle, ha scoperto che 60 balene su 75 presentavano abrasioni solo sulla mascella destra, e che gli altri 15 cetacei erano abrasi solo sulla mascella sinistra. Una chiara prova del fatto che le megattere avevano preferito un lato della mascella per la raccolta del cibo e che la «mandibolarità destra» era di gran lunga la norma.

In breve, tutte le classi di vertebrati – pesci, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi – conservano una tendenza probabilmente ancestrale all'uso del lato destro nel comportamento alimentare.

Origini della lateralità manuale destra

Che cosa dicono questi dati sulla presunta unicità della nostra manulateralità destra? Le prove di una preferenza destrorsa negli uccelli e nelle balene sono interessanti, ma non confutano la convinzione che la lateralità destra dell'uomo sia una novità evolutiva. Eppure più di una decina di studi recenti hanno dimostrato una tendenza alla lateralità destra negli altri primati, i nostri parenti più vicini. È un chiaro indizio che la lateralità destra nell'uomo discende da quella dei primati primitivi: la preferenza per la mano destra si manifesta nelle scimmie (babbuini, scimmie cappuccine e macachi), comprese le antropomorfe, specie gli scimpanzè.

Molti degli studi sulle antropomorfe sono stati condotti da William D. Hopkins dello Yerkes National Primate Research Center di Atlanta. Hopkins ha osservato preferenze per la mano destra, in particolare nei compiti che prevedevano sia la coordinazione di entrambe le mani sia l'avvicinamento della mano a un cibo collocato troppo in alto e afferrabile solo in posizione eretta. In un esperimento, il ricercatore ha messo del miele in un corto tubo di plastica, che ha poi dato a una delle scimmie. L'animale doveva afferrare il tubo con una mano e grattare il miele con un dito dell'altra mano. I primati preferivano grattare il miele con un dito della mano destra in un rapporto di 2 a 1. In modo simile, negli esperimenti di avvicinamento della mano a un oggetto, di solito le scimmie afferravano il cibo con la mano destra.

Inoltre, le scoperte dello Yerkes Center indicano che, quando i primati si sono evoluti per eseguire compiti più difficili e complicati, la loro lateralità manuale è diventata più forte. La nostra ipotesi è che eseguire compiti sempre più complessi abbia accresciuto la necessità di un passaggio più diretto dal cervello alla mano esperta. Poiché la strada più diretta dall'emisfero sinistro, specializzato nei compiti ordinari, al corpo segue le vie di incrocio nel corpo dei nervi periferici, la mano destra è diventata la preferita tra i primati non umani nell'esecuzione di compiti complicati, anche se di routine.

Comunicazione e cervello sinistro

Oggi l'origine evolutiva dell'abilità manuale destra nell'uomo attraverso la modificazione dell'antico comportamento alimentare nei primati superiori ancestrali sembra molto probabile. Ma è possibile che il comportamento alimentare abbia dato origine anche alla specializzazione del linguaggio nel cervello sinistro? Non intendiamo ipotizzare che questo sviluppo sia stato diretto. Piuttosto, sosteniamo che il «cervello linguistico» è emerso da una specializzazione intermedia, e per certi verso meno primitiva, dell'emisfero sinistro: la specializzazione per la comunicazione ordinaria, vocale e non vocale. Ma, contrariamente a convinzioni radicate fra gli studiosi di preistoria umana, nessuna di queste due abilità comunicative è nata per prima nella specie umana: anch'esse derivano da specializzazioni emisferiche comparse in animali esistenti ben prima della nostra comparsa.

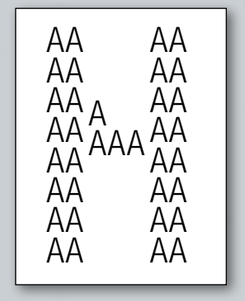
Per esempio studi sugli uccelli hanno dimostrato che l'emisfero sinistro controlla il comportamento canoro, e in leoni marini, cani e scimmie controlla la percezione dei richiami di altri membri della specie. Lesley Rogers, insieme a Michelle A. Hook-Costigan della Texas A&M University, ha osservato che una specie di uistitì (*Callithrix jacchus*) apre più frequentemente la parte destra della bocca rispetto alla sinistra nei richiami amichevoli verso altri uistitì. E così le persone, quando parlano, aprono il lato destro della bocca con più frequenza del lato sinistro, un comportamento causato da un'attivazione più intensa del lato destro del volto a opera dall'emisfero sinistro.

Ma in natura sono poche le cose universali, e in alcuni animali una risposta vocale a circostanze emotivamente intense è stata collegata al cervello sinistro e non, come atteso, a quello destro. Quando un maschio di rana è afferrato e bloccato da dietro da un rivale, l'emisfero sinistro controlla le risposte vocali dell'aggredito. Nei topi, l'emisfero sinistro controlla la percezione dei richiami di disagio nei neonati, e nei gerbilli, una specie di criceto, controlla i richiami durante la copulazione. Ma quegli animali potrebbero essere un'eccezione: nell'uomo e nelle scimmie, e forse nella maggior parte degli animali, il cervello destro prende il controllo solo nelle vocalizzazioni con elevato contenuto emotivo, mentre quello sinistro rimane legato alla routine.

Anche la comunicazione non vocale umana ha antecedenti evolutivi. Gli scimpanzè sono quasi sempre destrimani non solo manipolando oggetti, ma anche nei gesti comunicativi. Pure i gorilla coinvolgono la mano destra in comunicazioni complesse, che comprendono anche testa e bocca. Adrien Meguerditchian e Jacques Vauclair, dell'Università della Provenza, hanno osservato una tendenza destrimane nei babbuini in una forma di comunicazione manuale (tamburellare sul terreno).

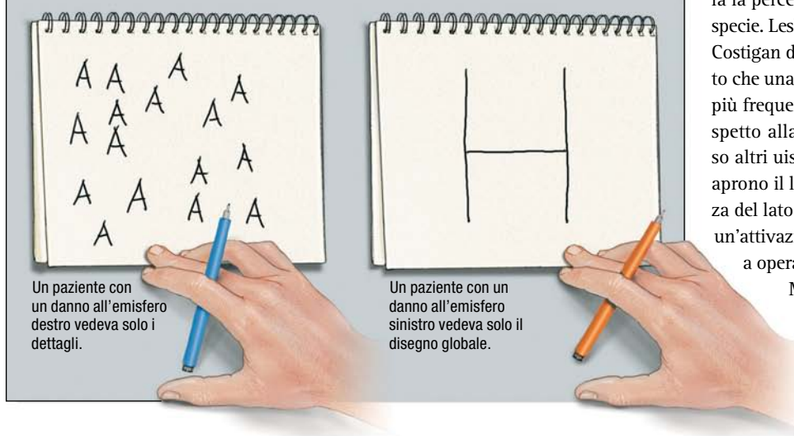
Il significato evolutivo di questi comportamenti diventa chiaro osservando che anche l'uomo co-

La divisione del lavoro



▲ Disegno originale

In un classico esperimento, Dean C. Delis, dell'Università della California a San Diego, ha chiesto a pazienti con danni cerebrali di studiare il disegno di una grande «H» maiuscola composta da diverse «A» (*sinistra*) e poi di ridisegnarlo a memoria. I pazienti con un danno all'emisfero destro (e che dunque dipendevano solo dall'emisfero sinistro) spesso disegnavano solo «A» sparse sul foglio (*in basso a sinistra*). Invece i pazienti con un danno all'emisfero sinistro disegnavano solo una grande «H» maiuscola senza lettere «A» (*in basso a destra*). L'emisfero sinistro caratterizza dunque gli stimoli in base a uno o pochi dettagli, mentre quello destro è specializzato nella sintesi di figure globali.



Un paziente con un danno all'emisfero destro vedeva solo i dettagli.

Un paziente con un danno all'emisfero sinistro vedeva solo il disegno globale.

Andrew Swift; fonte: *Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli*, di D.C. Delis e altri, in «Neuropsychologia», Vol. 24, n. 2, 1986.

GLI AUTORI

PETER F. MACNEILAGE è professore di psicologia all'Università del Texas ad Austin. Ha scritto più di 120 articoli sull'evoluzione di sistemi di azioni complesse. Il suo libro *The Origin of Speech* è stato pubblicato lo scorso anno dalla Oxford University Press.
GIORGIO VALLORTIGARA è professore di neuroscienze cognitive al Centro Mente-Cervello dell'Università di Trento. Insieme a Lesley J. Rogers, ha scoperto per la prima volta un'asimmetria funzionale del cervello nei pesci e negli anfibi.
LESLEY J. ROGERS è professore emerito di neuroscienze e di comportamento animale all'Università del New England, in Australia. Ha scoperto la lateralizzazione nel prosencefalo di pollo quando si pensava che la lateralizzazione fosse una caratteristica esclusiva del cervello umano.

munica con la mano destra. Il comportamento lateralizzato condiviso con i babbuini ci dice che le comunicazioni destrimani sono emerse in antenati comuni, risalenti forse a 40 milioni di anni fa, ben prima dell'evoluzione degli ominidi.

L'evoluzione della parola

Resta un grosso interrogativo: in che modo comportamenti già controllati dal cervello sinistro – alimentazione, vocalizzazione, comunicazione con la mano destra – sono stati modificati per poi usare le parole, uno dei passaggi più significativi della storia della vita sulla Terra?

Uno di noi (MacNeilage) ipotizza che sia necessaria l'evoluzione della sillaba, l'unità alla base di un flusso verbale nel tempo. La tipica sillaba è un'alternanza ritmica di consonanti e vocali. Ricordiamo che le consonanti sono i suoni creati quando il tratto vocale è chiuso o quasi chiuso, e che le vocali sono i suoni creati per risonanza con la forma del tratto vocale quando l'aria fluisce relativamente libera attraverso la bocca aperta. La sillaba potrebbe essersi evoluta come prodotto secondario del sollevamento (consonante) e abbassamento (vocale) alternati della mandibola, comportamenti già consolidati negli atti di masticare, succhiare e leccare. Forse una serie di questi cicli della bocca, prodotti come schiocchi labiali, è stata usata da uomini primitivi come segnale di comunicazione, lo stesso ruolo presente oggi in molte specie di primati.

Successivamente, la capacità di vocalizzazione della laringe sarebbe stata abbinata agli schiocchi comunicativi delle labbra, formando sillabe espresse verbalmente. Forse queste ultime sono state usate in un primo tempo per simboleggiare singoli concetti, formando parole. Poi presumibilmente la capacità di formare frasi (linguaggio) si è evoluta quando i primi uomini hanno combinato i due tipi di parole che veicolano il significato principale delle frasi: per gli oggetti (sostantivi) e per le azioni (verbi).

L'emisfero destro

Veniamo alla seconda parte della nostra ipotesi: quanto è solida la prova che, nell'evoluzione primitiva dei vertebrati, l'emisfero destro si è specializzato per individuare stimoli inattesi e rispondere a essi? E come si è evoluta e trasformata quella specializzazione? Diverse scoperte a favore dell'ipotesi riguardano studi delle reazioni di diverse specie animali ai predatori. In fondo, pochi eventi negli antichi ambienti dei vertebrati sarebbero stati più inattesi ed emotivamente intensi della comparsa improvvisa di un predatore. Quasi certamente, pesci, anfibi, uccelli e mammiferi reagiscono con una fuga più intensa a predatori visti nella parte sinistra del campo visivo (il lato destro del cervello) che in quella destra (*si veda il box a p. 54*).

Gli studi con *imaging* cerebrale mostrano nell'uomo un'analoga specializzazione alle reazioni. Tirando le somme di queste ricerche, Michael D. Fox della Washington University di St. Louis ha dedotto che l'uomo ha un «sistema dell'attenzione» nell'emisfero destro sensibile a «stimoli rilevanti per il comportamento» e inattesi o, più semplicemente, allo stimolo che dice: «Pericolo imminente!» Questo sistema dell'attenzione contribuisce a dare un senso a un'altra inspiegabile propensione: in laboratorio, persone anche destrimani rispondono a stimoli inattesi più rapidamente con la mano sinistra (emisfero destro) che con la mano destra.

Persino in assenza di pericolo, molti vertebrati conservano un occhio sinistro vigile verso qualsiasi predatore visibile. In molti animali, questa precoce specializzazione dell'emisfero destro per il comportamento guardingo si estende a quello aggressivo. Rospi, camaleonti, galli e babbuini attaccano con più probabilità membri della loro specie dalla loro parte sinistra che da quella destra.

Nell'uomo, i comportamenti primitivi di evitamento e cautela che manifestano attenzione nell'emisfero destro degli animali non umani si sono trasformati in emozioni negative. Nel XIX secolo i medici osservarono pazienti con paralisi isteriche degli arti più spesso sul lato sinistro che su quello destro. E poi ci sono prove di un controllo da parte dell'emisfero destro delle grida e dei richiami nella specie umana, in contrasto con le vocalizzazioni emotivamente neutre, controllate dall'emisfero sinistro. Inoltre, siamo più inclini alla depressione dopo un danno all'emisfero sinistro più che a quello destro, e negli stati di depressione cronica l'emisfero destro è più attivo del sinistro.

Riconoscere i propri simili

Oltre alla comparsa improvvisa di un predatore, i cambiamenti ambientali più evidenti a cui i vertebrati primitivi dovevano reagire erano gli incontri con altri membri della specie. Nei pesci e negli uccelli, l'emisfero destro riconosce i membri del gruppo e controlla il comportamento che richiede una reazione. Quindi, il ruolo di questo emisfero nella percezione dei volti ha la sua probabile origine evolutiva in un'abilità dei vertebrati primitivi: riconoscere la comparsa di individui conspecifici.

Per esempio, solo alcune specie di pesci – tra i vertebrati evolutivamente più antichi – saprebbero riconoscere singoli pesci, e gli uccelli hanno un emisfero destro che riconosce singoli membri della loro specie. Keith M. Kendrick, dell'Università di Cambridge, ha mostrato che le pecore riconoscono a memoria il volto di altre pecore (e di persone), e che il responsabile è quasi sempre l'emisfero destro. Charles R. Hamilton e Betty A. Vermeire della Texas A&M University hanno osservato un comportamento simile nelle scimmie.

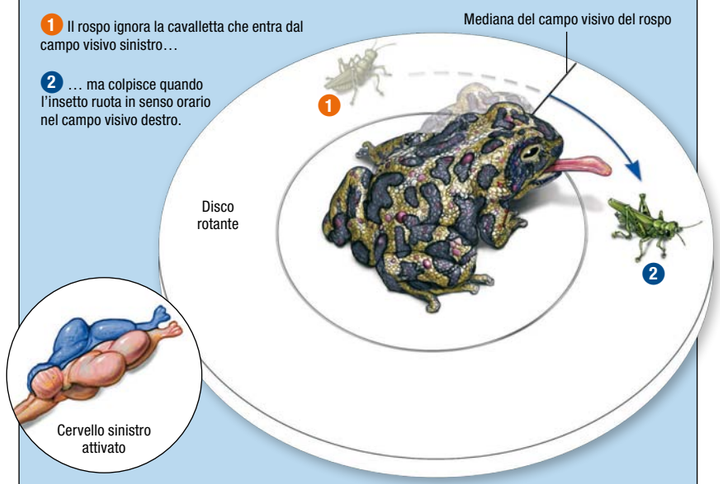
Di recente si è scoperto che l'emisfero destro umano è specializzato nel riconoscimento dei volti. La prosopagnosia, disturbo che compromette quest'abilità, è più spesso il risultato di un danno all'emisfero destro che a quello sinistro. Estendendo il riconoscimento a ciò che sembra un altro livello, sia le scimmie sia gli uomini interpretano le espressioni più accuratamente con l'emisfero destro. Crediamo che questa abilità appartenga a un'antica capacità dell'emisfero destro, cioè determinare l'identità o la familiarità: per stabilire, per esempio, se uno stimolo è già stato visto.

Globale e locale

Abbiamo distinto tra il ruolo dell'emisfero sinistro nell'azione normale e il ruolo dell'emisfero destro in circostanze insolite. Ma i ricercatori hanno anche mostrato nuove dicotomie. Nell'uomo, l'emisfero destro «assimila la scena intera», prestando attenzione agli aspetti globali dell'ambiente più che concentrarsi su un numero limitato di caratteristiche, una capacità vantaggiosa nell'analisi delle relazioni spaziali. I ricordi archiviati dall'emisfero destro sono organizzati e richiamati come strutture globali più che come serie di singoli elementi. A differenza dell'emisfero sinistro, che si concentra sugli aspetti locali del suo ambiente.

Cervello sinistro: comportamento ordinario

Una tendenza del lato destro, dunque del cervello sinistro, al controllo di schemi comportamentali consolidati in circostanze comuni, come catturare e mangiare una preda, si è riscontrata in quasi ogni classe di vertebrato studiata finora. Nell'esperimento qui sotto, una cavalletta finta era stata incollata su un disco girevole e ruotata in uno o nell'altro campo visivo di un rospo. Quando la cavalletta era messa a sinistra del rospo e ruotata in senso orario, era colpita solo dopo il passaggio oltre la mediana del campo visivo dell'anfibio. Quando la cavalletta era ruotata in senso antiorario, era colpita un numero minore di volte e con circa la stessa frequenza in ciascun campo visivo.

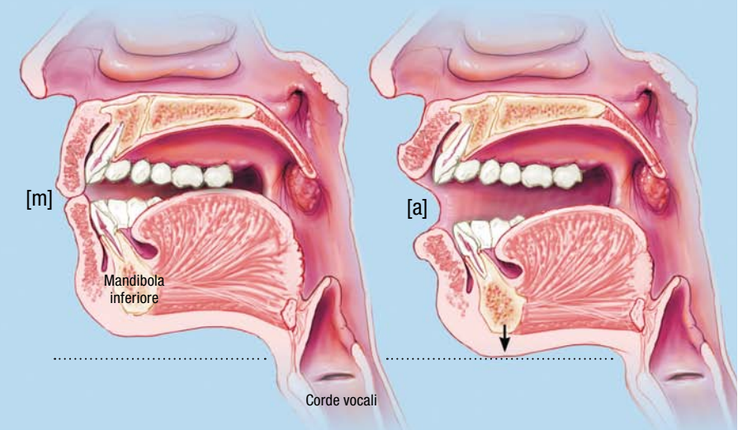


▼ Tra i molti altri animali che manifestano una preferenza per il lato destro in determinati comportamenti ci sono i babbuini e le balene, indicando un controllo da parte del lato sinistro del cervello. Adrien Meguerditchian e Jacques Vauclair, dell'Università della Provenza, hanno scoperto che i babbuini comunicano tamburellando sul terreno con la mano destra. Philip J. Clapham, ora all'Alaska Fisheries Science Center di Seattle, ha scoperto che le balene sono soggette ad abrasioni principalmente sul lato destro della mascella (*freccia*), segno che questi cetacei preferiscono di gran lunga quel lato per la raccolta del cibo.

Andrew Swift; fonti: *Complementary right and left hemifield use for predatory and agonistic behavior*, di G. Vallortigara e altri, in «Neuroreport», Vol. 9, n. 14, 1998, e *Lateralized prey catching responses in the cane toad,* Bufo marinus: *analysis of complex visual stimuli*, di A. Robins e L.J. Rogers, in «Animal Behaviour», Vol. 68, n. 4, 2004; Adrien Meguerditchian e Jacques Vauclair. Università della Provenza (*babbuini*); fonte: *Baboons Communicate with their right hand*, di A. Meguerditchian e J. Vauclair, in «Behavioural Brain Research», Vol. 171, n. 1, 2006; Provincetown Center for Coastal Studies (*balena*)

Dalla masticazione alla sillaba?

Secondo uno degli autori (MacNeilage), l'origine dell'uso della parola nell'uomo potrebbe essere riconducibile all'evoluzione della sillaba: in genere un'alternanza tra una consonante e una vocale. Nella parola *mama*, per esempio, ciascuna sillaba inizia con il suono consonantico [m] e termina con il suono vocalico [a]. Come illustrano i disegni in sezione, il suono [m] è generato sollevando la mascella, o mandibola inferiore, e interrompendo il flusso di aria dai polmoni chiudendo le labbra (*in basso a sinistra*). Per generare il suono vocalico successivo [a], la mascella si abbassa e l'aria fluisce liberamente nel tratto vocale (*in basso a destra*). MacNeilage ha perciò ipotizzato che la generazione di espressioni sillabiche sia una modificazione evolutiva del comune comportamento di masticazione, che è stato controllato dal lato sinistro del cervello a partire dall'evoluzione dei primi vertebrati.



Andrew Swift; fonte: Susanna Douglas, Università del Texas ad Austin

LATO SINISTRO FOTOGENICO

Uno studio del 1999 dei quadri esposti alla National Portrait Gallery di Londra, sede di una delle più grandi collezioni di ritratti al mondo, ha analizzato le direzioni in cui hanno ruotato la testa i soggetti che hanno posato per i dipinti.

- In generale, i soggetti hanno ruotato leggermente la testa verso destra, mostrando così il lato sinistro del volto. Secondo gli studiosi, le persone ritratte volevano mostrare il lato sinistro perché è controllato dall'emisfero destro del cervello, specializzato nell'elaborazione delle emozioni.
- I ritratti dei maschi mostrano però una minore preferenza per il lato sinistro, forse per un desiderio di nascondere le emozioni.
- I ritratti di scienziati membri della Royal Society non hanno mostrato alcuna preferenza per il lato sinistro.

Prove sorprendenti a favore della dicotomia locale-globale nell'uomo emergono nell'esecuzione di un compito concepito da David Navon, dell'Università di Haifa. Nell'esperimento viene chiesto a pazienti con un danno cerebrale di copiare un disegno in cui circa 20 piccole lettere «A» maiuscole formano una lettera «H» maiuscola di grandi dimensioni (*si veda il box a p. 51*). I pazienti con un danno all'emisfero sinistro creano il più delle volte una lettera H con una linea semplice, senza tracciare alcuna lettera «A», mentre i pazienti con un danno all'emisfero destro disperdono le lettere «A» sul foglio, senza un ordine sistematico.

Una dicotomia simile è stata scoperta nel pollo, suggerendo un'evoluzione antica. Richard J. Andrew, dell'Università del Sussex, e Vallortigara hanno scoperto che il pollo domestico, come l'uomo, presta speciale attenzione con l'emisfero destro a relazioni spaziali ampie. E che i polli con l'occhio destro coperto, i quali dunque ricevono segnali solo nell'emisfero destro, mostrano interesse per un'ampia gamma di stimoli. Evidentemente stanno prestando attenzione al loro ambiente globale. I polli che prestano attenzione solo con l'emisfero sinistro (occhio sinistro coperto) si concentrano invece solo su caratteristiche locali.

Perché gli emisferi si specializzano?

Perché i vertebrati hanno favorito la separazione di alcune funzioni in una o nell'altra metà del cervello? Per valutare uno stimolo, un organismo deve fare due analisi simultanee. Deve stimare la novità complessiva dello stimolo e compiere l'azione urgente decisiva, se necessaria (emisfero destro). E deve stabilire se lo stimolo si inquadra in una categoria familiare, e generare una risposta consolidata richiesta, qualunque sia (emisfero sinistro).

Per rilevare la novità, l'organismo deve prestare attenzione a caratteristiche che contraddistinguono l'unicità dell'esperienza. La percezione spaziale richiede praticamente lo stesso tipo di «fiuto per la novità», perché quasi ogni punto di vista adottato da un animale genera una nuova configurazione di stimoli. Questa è una funzione dell'emisfero destro. Viceversa, per inquadrare un'esperienza in una categoria, l'organismo deve riconoscere quali caratteristiche si stanno riproponendo, e ignorare o scartare quelle peculiari. Il risultato è l'attenzione selettiva, una delle facoltà più importanti del cervello: una funzione dell'emisfero sinistro.

Forse allora le specializzazioni emisferiche si sono evolute perché collettivamente sono più efficienti nell'elaborazione simultanea di entrambi i tipi di informazione in un cervello privo di sistemi specializzati. Per verificare la teoria, dovevamo confrontare le capacità di animali con il cervello lateralizzato con quelle di animali della stessa specie con il cervello non lateralizzato. Se la nostra idea era corretta, gli animali con il cervello lateralizzato potevano eseguire parallelamente le funzioni degli emisferi destro e sinistro con più efficienza rispetto a quelli col cervello non lateralizzato.

La Rogers aveva già mostrato che, esponendo l'embrione di un pollo domestico alla luce o al buio prima della schiusa, si indirizzava lo sviluppo della specializzazione emisferica verso determinate funzioni. Poco prima della schiusa, la testa dell'embrione di pollo ha un orientamento asimmetrico naturale, per cui l'occhio sinistro è coperto dal corpo. Quindi solo l'occhio destro è stimolato dalla luce che attraversa il guscio e che attiva lo sviluppo di alcune specializzazioni visive emisferiche. Incubando le uova al buio, Rogers ha impedito lo sviluppo di queste specializzazioni, scoprendo che il trattamento senza luce impedisce all'emisfero sinistro di sviluppare la sua normale abilità superiore di separare i semi dai sassolini, oltre a impedire che l'emisfero destro diventi più reattivo ai predatori di quello sinistro.

Rogers e Vallortigara, in collaborazione con Paolo Zucca dell'Università di Teramo, hanno analizzato il comportamento di entrambi i tipi di pollo in un doppio compito: i polli dovevano trovare i semi sparsi tra i sassolini stando contemporaneamente attenti alla comparsa dall'alto di un predatore. I polli incubati alla luce eseguivano i compiti simultaneamente, mentre quelli incubati al buio non ne erano capaci. Era la conferma che un cervello lateralizzato è un elaboratore più efficiente.

«Rottura della simmetria» sociale

Consentire un'elaborazione separata e in parallelo nei due emisferi potrebbe aumentare l'efficienza del cervello, ma non spiega perché, in una data specie, predomina l'una o l'altra specializzazione. Perché, nella maggior parte degli animali, l'occhio sinistro (e l'emisfero destro) è più adeguato di quello destro (e dell'emisfero sinistro) nella vigilanza contro i predatori? Che cosa rende più probabile la predominanza di un tipo di lateralità rispetto a una miscela simmetrica, al 50 per cento, di entrambe?

Evolutivamente, una rottura della simmetria, con popolazioni costituite in prevalenza da tipi sinistri o destri, potrebbe essere svantaggiosa: il comportamento degli individui sarebbe più prevedibile per i predatori, che imparerebbero ad avvicinarsi dal lato meno vigile della preda, riducendo la probabilità di essere scoperti. La percentuale diseguale di individui destrorsi e sinistrorsi in molte popolazioni indica perciò che questo squilibrio deve essere prezioso se si è conservato a dispetto di una maggiore vulnerabilità verso i predatori. Rogers e Vallortigara hanno suggerito che, negli animali sociali, il vantaggio della conformità potrebbe risiedere nel sapere che cosa aspettarsi da altri membri della specie.

Insieme con Stefano Ghirlanda, delle Università di Stoccolma e di Bologna, Vallortigara ha di recente dimostrato matematicamente che popolazioni dominate da individui sinistrorsi oppure destrorsi nascono in modo spontaneo se la popolazione ha costi e benefici dipendenti dalla frequenza. La teoria dei giochi dimostra che la migliore linea di condotta di un individuo dipende da quello che decide di fare la maggior parte dei membri del gruppo. Applicando la teoria dei giochi, Ghirlanda e Vallortigara hanno dimostrato che il comportamento destrorso o sinistrorso può evolversi in una popolazione sottoposta a pressioni selettive di natura sociale, ovvero quando individui asimmetrici devono coordinarsi con altri membri della stessa specie. Per esempio, è pensabile che i pesci in banco abbiano evoluto preferenze uniformi per un cambio di direzione, e che invece i pesci solitari cambino le preferenze di direzione a caso, vista la loro scarsa necessità di nuotare in gruppo. Ed è quello che succede.

Una volta realizzato che il cervello asimmetrico non è specifico dell'uomo, nascono nuovi interrogativi su diverse funzioni superiori nella nostra specie: quali sono i rispettivi ruoli degli emisferi destro e sinistro nella consapevolezza di sé, nella coscienza, nell'empatia e nei lampi di intuizione? Sappiamo ancora poco a questo riguardo. Ma le scoperte che abbiamo descritto indicano che capiremo meglio queste funzioni, e altri fenomeni umani discussi nell'articolo, inquadrandole nella discendenza con modificazioni di capacità che esistevano prima di noi. ■

Cervello destro: risposta alla sorpresa

La comparsa improvvisa di un predatore – o di un altro membro della propria specie – richiede un'appropriata azione istantanea, e il cervello destro si è evoluto per gestire questi eventi. In un altro esperimento con i rospi, la testa di gomma di un finto serpente attaccato all'estremità di un bastone di plastica nero è stata spinta verso il rospo da sinistra o da destra, e poi rapidamente ritirata. Quando il «serpente» compariva alla destra del rospo, veniva ignorato. Quando invece compariva alla sinistra del rospo il «serpente» scatenava una risposta dal cervello destro dell'anfibio, che scappava via con un balzo.

▼ Molti vertebrati riconoscono individui della loro specie. Keith M. Kendrick, del Babraham Institute di Cambridge, ha dimostrato che le pecore riconoscono altre pecore a memoria, principalmente con l'emisfero destro. Anche negli uccelli, per esempio le sule mascherate, l'emisfero destro consente il riconoscimento reciproco.

Andrew Swift; fonte: *Lateralisation of predator avoidance responses in three species of toads*, di G. Lippolis e altri, in «Laterality», Vol. 7, n. 2, 2002; John Giustina/Getty Images (*pecora*); Kevin Morris/Getty Images (*sula mascherata*)

Lateralizzato è più efficiente

Uno degli autori (la Rogers) ha scoperto che, esponendo embrioni di pollo alla luce o al buio prima della schiusa, poteva controllare se le due metà del cervello del pollo sviluppavano le loro specializzazioni per la percezione visiva, ovvero se i polli erano nati con un cervello debolmente o fortemente lateralizzato. Rogers e Vallortigara, insieme con Paolo Zucca, hanno poi confrontato – nel caso di due compiti – polli normali fortemente lateralizzati con polli debolmente lateralizzati. Un compito consisteva nel selezionare semi di cibo da piccoli sassolini (di solito un compito svolto dall'emisfero sinistro), e il secondo compito consisteva nel rispondere a un modello di un predatore (la sagoma di un falco).
I polli debolmente lateralizzati non avevano alcun problema a imparare a distinguere i semi dai sassolini quando non era presente alcuna sagoma di falco. Ma quando il falco «volava» sulla loro testa, accadeva di frequente che non riuscissero a percepirlo, ed erano molto più lenti dei polli normali a imparare a beccare i semi invece dei sassolini. In breve, senza la specializzazione degli emisferi cerebrali, i polli erano incapaci di eseguire simultaneamente i due compiti separati.

Stockbyte/Getty Images (*pulcino*)

➡ Letture

Comparative Vertebrate Lateralization. Rogers L.J. e Andrew R.J. (*a cura*), Cambridge University Press, 2002.

Advantages of Having a Lateralized Brain. Rogers L.J., Zucca P. e Vallortigara G., in «Proceedings of the Royal Society B», Vol. 271, Suppl. 6, pp. S420-S422, 7 dicembre 2004.

Survival with an Asymmetrical Brain: Advantages and Disadvantages of Lateralization. Vallortigara G. e Rogers L.J., in «Behavioral and Brain Sciences», Vol. 28, n. 4, pp. 575-633, agosto 2005.

The Origin of Speech. MacNeilage P.F., Oxford University Press, 2008.

Mechanisms and Functions of Brain and Behavioural Asymmetries. Tommasi L., in «Philosophical Transactions of the Royal Society B», Vol. 364, pp. 855-859, 12 aprile 2009.

Rivedere i limiti della crescita

PIÙ PERSONE, MENO COMBUSTIBILI. Negli ultimi quarant'anni la popolazione globale è raddoppiata. Le carestie sono state contenute grazie alla disponibilità di combustibili fossili a buon mercato, che hanno permesso produzioni alimentari abbondanti.

Ladi Kim/Alamy

IN SINTESI

- Negli anni sessanta e settanta, scienziati ed economisti hanno analizzato il rapporto tra crescita demografica e consumo delle risorse; in particolare del petrolio, fondamentale per la produzione alimentare.
- Le previsioni fatte in quegli anni sono state ignorate perché finora non si sono verificate scarsità di petrolio rilevanti. Ma riesaminando quei modelli si scopre che le previsioni erano corrette.
- Presto il greggio a buon mercato potrebbe finire, con conseguenze pericolose sulla produzione alimentare. Dunque è necessario ridiscutere il futuro della crescita dell'umanità dopo il picco del petrolio.

Il petrolio a buon mercato sta per finire, con conseguenze pericolose sulla produzione alimentare. È necessario ridiscutere i limiti della nostra crescita

di Charles A.S. Hall e John W. Day, Jr.

Negli ultimi decenni c'è stato un acceso dibattito sia nel mondo accademico sia sui mezzi di comunicazione riguardo l'impatto ambientale delle attività umane, specialmente quelle correlate con i cambiamenti climatici e la biodiversità. Pochissima attenzione, invece, è stata rivolta al problema della diminuzione delle risorse disponibili. Nonostante il disinteresse generale, tuttavia, sia il calo delle risorse sia la crescita demografica sono proseguiti senza sosta.

La questione più imminente sembra la diminuzione delle riserve petrolifere, visto che secondo alcune fonti la produzione mondiale avrebbe già raggiunto il massimo e inizierebbe a declinare. In realtà il problema riguarderebbe una lunga lista di risorse, al punto che secondo l'esperto Richard Heinberg saremmo vicini al «picco di tutto». Secondo noi, questi problemi sono già stati descritti e impostati correttamente verso la metà del secolo scorso, e gli eventi attuali non farebbero altro che dimostrare la fondatezza di quelle vecchie idee. Molte di esse furono esposte in un'opera fondamentale pubblicata nel 1972: il *Rapporto sui limiti dello sviluppo*.

Negli anni sessanta e settanta, la nostra formazione e le nostre idee sono stati influenzate da scritti di ecologisti e informatici che parlavano in maniera chiara ed eloquente del conflitto tra una popolazione in crescita (e l'enorme aumento dei suoi bisogni materiali) e le risorse limitate del pianeta. L'esplosione del prezzo del petrolio e le lunghe code ai distributori degli anni settanta confermarono a molti che quelle idee erano corrette e che in un futuro non lontano il genere umano avrebbe dovuto affrontare i limiti della propria crescita. A quell'epoca era chiaro che la cultura della crescita, tipica dell'economia statunitense, sarebbe presto stata soggetta ai limiti imposti dalla natura. Negli anni settanta infatti uno di noi (Hall) pianificò una prudente vita da pensionato basandosi sulla previsione secondo cui gli effetti del picco del petrolio sarebbero cominciati nel 2008, quando sarebbe finalmente andato in pensione.

Quelle idee sono più che mai attuali, anche se, almeno fino a poco tempo fa, erano scomparse dall'agenda dei politici, dalle analisi dei giornali e dai piani di studio universitari. La nostra sensazione è che siano in pochi a occuparsi di questi temi, e che la maggior parte di questi pochi ritenga che tecnologia ed economia di mercato abbiano risolto i problemi. Gli allarmi lanciati dal *Rapporto sui limiti dello sviluppo*, e la nozione stessa di limiti alla crescita, sono considerati superati.

Persino gli ecologisti hanno spostato la loro attenzione dalle risorse per concentrarsi, certo non in modo sbagliato, sulle minacce alla biosfera e alla biodiversità. Raramente ricordano l'equazione che sussiste tra risorse disponibili e numero di esseri umani, fondamentale per primi ecologisti. Per esempio il numero del febbraio 2005 di «Frontiers in Ecology and the Environment» era dedicato alle prospettive per un futuro sostenibile, ma la parola «energia» compariva solo nell'accezione «energia creativa» individuale, mentre «risorse» e «popolazione umana» erano citate a malapena.

Ciò significa che la teoria dei limiti dello sviluppo si è rivelata sbagliata? Già prima dei collassi finanziari del 2008 i giornali pubblicavano articoli sull'aumento dei prezzi dell'energia e degli alimenti, sulla fame diffusa e sui conseguenti disordini in molte città, e su carenze di materiali di vario tipo. In seguito i titoli si sono concentrati sul collasso del sistema bancario, sull'aumento della disoccupazione, sull'inflazione e sulla crisi economica. Per molte persone una parte sostanziale dell'attuale caos economico è stata causata dagli aumenti del prezzo del petrolio registrati nel 2008.

Sebbene in molti continuino a respingere gli scritti di quei ricercatori degli anni settanta, sono sempre di più i dati che confermano che avevano ragione, anche se non sempre nei dettagli e nei tempi, sui pericoli di una crescita demografica il-

EFFETTO SOVRAPPOPOLAZIONE. Un villaggio del Bangladesh devastato da un ciclone nel 1991, anno in cui persero la vita più di 125.000 persone. Anche se consapevoli del rischio, gli abitanti di queste aree non possono trasferirsi in zone più sicure a causa della sovrappopolazione.

AP/Wide World Photos

limitata in un mondo vicino ai propri limiti materiali. È ora di riconsiderare quelle teorie alla luce delle nuove informazioni in nostro possesso, soprattutto sul picco del petrolio.

I primi allarmi

Una discussione del rapporto tra risorse e popolazione inizia sempre con Thomas Malthus e il suo *Saggio sul principio della popolazione* del 1798:

> Penso di potere formulare in tutta onestà due postulati. Primo, che il cibo è necessario all'esistenza dell'uomo. Secondo che la passione tra i sessi è necessaria e che press'a poco resterà nello stato attuale. [...] Considerando dunque ammessi i miei postulati, affermo che il potere di popolazione è infinitamente maggiore del potere che ha la terra di produrre sussistenza per l'uomo. La popolazione, quando non è frenata, aumenta in progressione geometrica. La sussistenza aumenta soltanto in progressione aritmetica. [...] Una familiarità anche superficiale con i numeri mostrerà l'immensità del primo potere a paragone con il secondo.

Quasi tutti, compresi gli autori di questo articolo, concordano sul fatto che dal 1800 ai giorni nostri le premesse di Malthus si sono rivelate sbagliata, visto che la popolazione umana è cresciuta di circa sette volte, con un parallelo miglioramento della disponibilità alimentare e della ricchezza in generale (sebbene solo in tempi recenti). In *La fine del cibo*, il giornalista Paul Roberts afferma che nel XIX secolo la malnutrizione era diffusa, ed è stato solo nel XX secolo che l'energia fossile a buon mercato ha permesso una produttività agricola sufficiente a prevenire la fame.

Lo stesso concetto è già stato espresso altre volte: l'aumento esponenziale dello sfruttamento delle risorse energetiche, comprese quelle impiegate in agricoltura, è la ragione principale per cui la produzione alimentare ha potuto crescere geometricamente, tenendo il passo con l'aumento della popolazione. In definitiva, dai tempi di Malthus siamo riusciti a evitare una carestia quasi globale perché anche lo sfruttamento dei combustibili fossili è cresciuto geometricamente.

Tra gli scienziati del XX secolo, i primi che hanno ripreso le preoccupazioni di Malthus sono stati Garrett Hardin e Paul Ehrlich. Tra i saggi scritti negli anni sessanta da Hardin sulle conseguenze della sovrappopolazione c'è il celebre *Tragedy of the Commons*, in cui si spiega che gli individui tendono a sfruttare eccessivamente le risorse comuni a proprio vantaggio, anche se risulterà svantaggioso per tutti. Hardin scrisse altri saggi sulla popolazione, coniando frasi come «la libertà di riprodursi porterà tutti noi alla rovina» e «nessuno muore mai di sovrappopolazione», con cui intende che sebbene la sovrappopolazione non sia quasi mai una causa diretta di morte, tuttavia provoca malattie e fame, che sono letali. Questa frase fu pubblicata in un articolo sulla morte di migliaia di abitanti delle coste del Bangladesh investiti da un tifone. Hardin sosteneva che la popolazione sapesse benissimo che quella regione sarebbe stata inondata periodicamente ogni decina di anni, ma rimaneva lì perché non aveva altro posto dove vivere in un paese estremamente affollato. Lo stesso scenario si è ripetuto nel 1991 e nel 2006.

Nel suo libro *The population bomb*, del 1968, Ehrlich sosteneva che la continua crescita della popolazione avrebbe avuto effetti devastanti su risorse alimentari, salute e natura, e che prima o poi i processi malthusiani (guerra, carestia, pestilenza e morte) avrebbero riportato la popolazione umana «sotto controllo», ovvero entro la capacità del pianeta. Nello stesso periodo l'agronomo David Pimentel, l'ecologo Howard Odum e lo scienziato ambientale John Steinhart quantificarono la dipendenza energetica dell'agricoltura moderna, dimostrando che lo sviluppo tecnologico è quasi sempre associato a un aumento dell'uso dei combustibili fossili. Altri ecologi, tra i quali George Woodwell e Kenneth Watt, discussero dell'impatto negativo della popolazione umana sugli ecosistemi. Kenneth Boulding, Herman Daly e pochi altri economisti cominciarono a dubitare dei fondamenti dell'economia, tra cui la sua dissociazione dalla biosfera, che invece è necessaria per sostenerla, e la sua enfasi sulla crescita e sostituibilità infinita, ovvero l'idea che sarà sempre possibile sostituire una risorsa insufficiente.

Nel frattempo Jay Forrester, inventore della memoria RAM dei computer, iniziò a sviluppare una serie di analisi e processi di idee interdisciplinari, che chiamò «dinamica dei sistemi». Nei libri e negli articoli scritti in materia, Forrester parlava anche delle difficoltà che una popolazione umana in continua crescita avrebbe dovuto affrontare in un mondo finito. Questa teoria divenne subito nota come il modello dei limiti della crescita (o modello del Club di Roma, dal nome dell'organizzazione che aveva commissionato lo studio). I modelli di Forrester furono perfezionati e presentati al pubblico da due suoi studenti: Donella Meadows e Dennis Meadows. In base ai modelli, la crescita esponenziale della popolazione e dello sfruttamento delle risorse, combinata con la natura finita delle risorse stesse e dell'assorbimento degli inquinanti, avrebbe portato a un grave declino della qualità di vita e persino del numero di esseri umani.

Nel frattempo il geologo Marion King Hubbert predisse, prima nel 1956 e poi nel 1968, che la produzione di petrolio negli Stati Uniti avrebbe raggiunto il picco nel 1970. Gli avvertimenti di Hubbert furono ignorati, ma la produzione statunitense di greggio raggiunse effettivamente il massimo nel 1970 e quella di gas naturale nel 1973.

Le previsioni sui limiti della crescita sembrarono avverarsi nel 1973, quando, durante la prima crisi energetica, il prezzo del petrolio passò da 3,50 a oltre 12 dollari al barile. Negli Stati Uniti, a causa di una differenza di soli cinque punti percentuali tra offerta e domanda prevista, in poche settimane la benzina passò da meno di 30 centesimi di dollaro al gallone (circa quattro litri) a oltre 65, e le riserve disponibili diminuirono. Per la prima volta si formarono code ai distributori di benzina e si registrarono grossi aumenti anche nelle altre fonti di energia. L'inflazione raggiunse valori a due cifre, e ci fu una contrazione complessiva delle attività economiche. La presenza simultanea di inflazione e stagnazione economica era ritenuta impossibile dagli economisti, perché si supponeva che sussistesse una relazione di proporzionalità inversa tra i due fenomeni. Anche il gasolio per il riscaldamento, l'elettricità, il cibo e il carbone divennero molto più cari. E la situazione si ripeté nel 1979, quando il petrolio arrivò a 35 dollari al barile.

Alcuni dei problemi economici del 1974, come il più alto livello di disoccupazione dai tempi della Grande Depressione, gli elevati tassi di interesse e l'aumento dei prezzi, si ripresentarono nei primi anni ottanta. Nel frattempo nuovi studi ave-

I VALORI PREVISTI dal modello del Club di Roma sono molto simili ai dati reali del 2008. Il modello usava termini generali per risorse e inquinanti, mentre nella tabella sono forniti valori più precisi. È difficile ottenere dati accurati per un periodo così lungo; probabilmente molti inquinanti sono aumentati più di quanto indicato. Altri invece, come lo zolfo, sono stati tenuti sotto controllo in molti paesi.

Parametro	Previsto	Reale
Popolazione	6,9 miliardi	6,7 miliardi
Tasso di natalità per 1000 abitanti	29	20
Tasso di mortalità per 1000 abitanti	11	8,3
Valori rispetto al 1970 (= 1,0)		
Risorse	0,53	
Rame		0,5
Petrolio		0,5
Suolo		0,7
Pesci		0,3
Inquinanti	3,0	
CO_2		2,1
Azoto		2
Produzione industriale pro capite	1,8	1,9

GLI AUTORI

CHARLES A.S. HALL è professore al College of Environmental Science and Forestry della State University of New York a Syracuse. JOHN W. DAY JR. è professore emerito al Dipartimento di oceanografia e scienze costiere della Louisiana State University. Entrambi sono ecologi dei sistemi con diversi interessi e con esperienza nella gestione dell'energia e delle risorse. L'originale di questo articolo è stato pubblicato su «American Scientist», maggio-giugno 2009.

vano individuato una serie di questioni ambientali: piogge acide, riscaldamento globale, inquinamento, perdita di biodiversità e distruzione dello strato di ozono. Le carenze di petrolio, le code ai distributori e le interruzioni di elettricità degli anni settanta e dei primi anni ottanta sembravano confermare l'idea che la popolazione e l'economia avessero ecceduto la capacità della Terra di sostenerci. A molti sembrava che il mondo fosse diretto verso la catastrofe. Per chi aveva familiarità con i limiti della crescita sembrava che le previsioni del modello stessero avverandosi, confermandone la validità. Nel mondo accademico e sui mezzi di comunicazione si parlò molto di energia e dei problemi riguardanti la popolazione umana.

Il nostro contributo al dibattito consistette nel calcolare i costi energetici di molti aspetti della gestione delle risorse e dell'ambiente, tra cui la produzione alimentare, la gestione dei fiumi e, soprattutto, la produzione di energia. Uno dei punti fondamentali dei nostri studi fu il calcolo del ritorno energetico sull'investimento (*energy return on investment*, EROI) per l'estrazione di petrolio e gas negli Stati Uniti. I nostri calcoli dimostrarono che questo coefficiente era diminuito considerevolmente tra gli anni trenta e settanta, e fu subito chiaro che per la maggior parte delle alternative l'EROI era addirittura più basso. Ciò significava che si sarebbero dovute impiegare quantità sempre maggiori di energia per ricavare l'energia necessaria al normale funzionamento dell'economia.

L'inversione di tendenza

L'interesse iniziò a scemare quando in risposta all'aumento dei prezzi iniziarono a essere sfruttati enormi giacimenti di gas e di petrolio, già noti ma mai usati, al di fuori degli Stati Uniti, e inondarono il mercato nazionale. Alla maggior parte degli economisti *mainstream*, ma anche a molte persone comuni, non piaceva il concetto secondo cui possono esserci limiti naturali alla crescita economica o, più in generale, alle attività umane. E la scoperta di nuove risorse petrolifere sembrava confermare il loro punto di vista.

L'economia mainstream, o neoclassica, è centrata sull'efficienza, cioè sul concetto secondo cui le forze del mercato, prive di restrizioni, tenderebbero a raggiungere i prezzi più bassi in qualsiasi congiuntura. L'efficienza spingerebbe inoltre le forze produttive a essere sempre impiegate in maniera ottimale.

In particolare, agli economisti non piaceva l'idea della scarsità di risorse, tanto che scrissero una serie di articoli al vetriolo contro gli scienziati menzionati in precedenza, e in particolare quelli più vicini al Club di Roma. In queste note la fusione nucleare era citata come una delle possibili fonti di energia abbondante e a buon mercato per il futuro (sic!). Secondo gli economisti, inoltre, non c'era alcuna scarsità di risorse, visto che la produzione era aumentata tra l'1,5 e il 3 per cento all'anno, ma l'elemento più importante erano meccanismi interni basati sul mercato (la mano invisibile di Adam Smith) che avrebbero protetto le economie nei periodi di scarsità.

Un importante studio empirico condotto nel 1963 da Harold J. Barnett e Chandler Morse parve confermare che, escludendo l'inflazione, i prezzi di tutte le risorse di base (eccetto i prodotti forestali) erano rimasti stabili per più di novant'anni. Dunque, anche se non c'era dubbio sul fatto che si stavano intaccando le risorse di qualità più elevata, sembrava che l'innovazione e la sostituzione delle risorse, spinte dagli incentivi di mercato, avrebbero continuato indefinitamente a risolvere i nostri problemi. Era come se il mercato potesse aumentare le risorse esistenti sulla Terra.

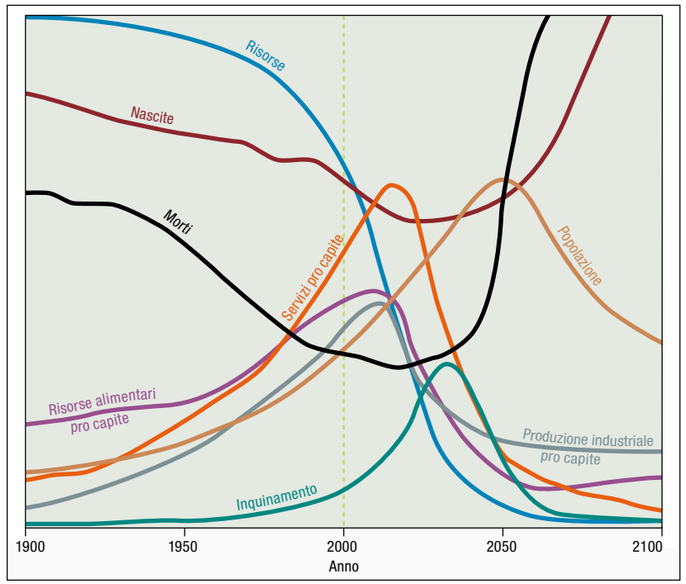
Il comportamento dell'economia sembrò dare loro ragione. Alla metà degli anni ottanta il prezzo della benzina scese considerevolmente. Gli enormi giacimenti della Baia di Prudhoe, in Alaska, vennero attivati e contribuirono a mitigare il calo di produzione in altre zone degli Stati Uniti, sebbene la percentuale di greggio importato dall'estero continuasse ad aumentare. Il tema dell'energia scomparve dai mezzi di comunicazione e dagli argomenti di conversazione. La liberalizzazione del mercato avrebbe dovuto creare efficienza e, quindi, un minore consumo di energia a parità di produzione economica. I dati di Giappone e Stati Uniti sembrarono confermare questa teoria. La produzione di elettricità fu spostata dal petrolio verso altre fonti, quali carbone, gas naturale e uranio.

Nel 1980 Paul Ehrlich, uno dei biologi più impegnati nella questione delle risorse, fu «costretto» dall'economista Julian Simon a scommettere sul prezzo futuro di cinque minerali. Simon era un fervente sostenitore dell'ingegno umano e del mercato, e non credeva ai limiti della crescita. Nei dieci anni successivi il prezzo dei cinque minerali scese, Ehrlich perse la scommessa e dovette pagare a Simon 576 dollari. La notizia fu pubblicata dai principali giornali, tra i quali il «New York Times Magazine», che pubblicò un impietoso articolo in cui si screditavano e umiliavano tutti quelli che avevano sostenuto la teoria delle risorse limitate.

Sembrava che l'economia avesse risposto con la mano invisibile delle forze di mercato attraverso i prezzi e le sostituzioni. Gli economisti ebbero la loro vendetta, e i pessimisti dovettero battere in ritirata, sebbene alcuni degli effetti della stagnazione economica degli anni settanta siano durati in gran parte del mondo fino al 1990. (Ancora oggi sono visibili, sotto forma di debito non pagato, in paesi come il Costa Rica.) All'inizio degli anni novanta le economie degli Stati Uniti e degli altri paesi erano in pratica tornate al modello adottato prima del 1973, con una crescita di almeno il 2-3 per cento annuo e con tassi di inflazione relativamente bassi. Il prezzo della benzina, l'indicatore più importante di scarsità di energia per la maggior parte dei consumatori, si stabilizzò e addirittura scese in seguito a un aumento delle importazioni di greggio. Tutte le discussioni riguardanti il calo delle risorse cessarono.

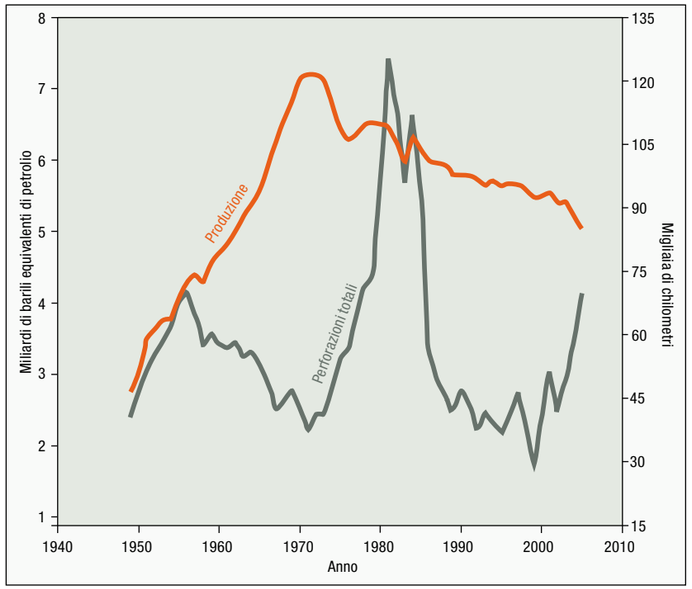
Il concetto che il mercato decidesse oggettivamente il valore dei beni e che fosse il mezzo migliore per prendere tutte le decisioni guadagnò credibilità, anche grazie alle conseguenze spesso infelici delle decisioni prese dagli esperti e dagli organi legislativi. Le decisioni si basarono sempre più

NEL SUD-EST DELL'ETIOPIA colpito dalla siccità, un gruppo di profughi (*a fronte*) attende la distribuzione gratuita di acqua. I bambini che cercano di procurarsene un po' prima dell'ora stabilita vengono cacciati a colpi di bastone. In alcune aree la limitata disponibilità di risorse fondamentali, come l'acqua, è già da decenni all'origine di tensioni a scala locale o regionale.



NELLE PROIEZIONI ORIGINALI del Club di Roma si esaminava la relazione tra popolazione, risorse e inquinanti tra 1900 e 2100, senza però alcuna data nel grafico. Se si inserisce a metà dell'ascissa l'anno 2000, si scopre che le previsioni fino a oggi sono sostanzialmente corrette. Riguardo, invece, le forti oscillazioni previste per i prossimi decenni, il futuro ci dirà se sono verosimili.

Elaborazione «Le Scienze» (*grafici*)



IL GRAFICO CONFRONTA la produzione di petrolio e gas negli Stati Uniti tra il 1949 e il 2005 con l'entità delle perforazioni. A parità di altri fattori, il ritorno energetico sull'investimento (EROI) è inferiore quando i tassi di perforazione sono alti, perché prospezione e perforazione richiedono ingenti quantità di energia. Oggi l'EROI potrebbe avvicinarsi a 1:1 per la scoperta di nuovi giacimenti.

AP Images/Brennan Library (*profughi etiopi*)

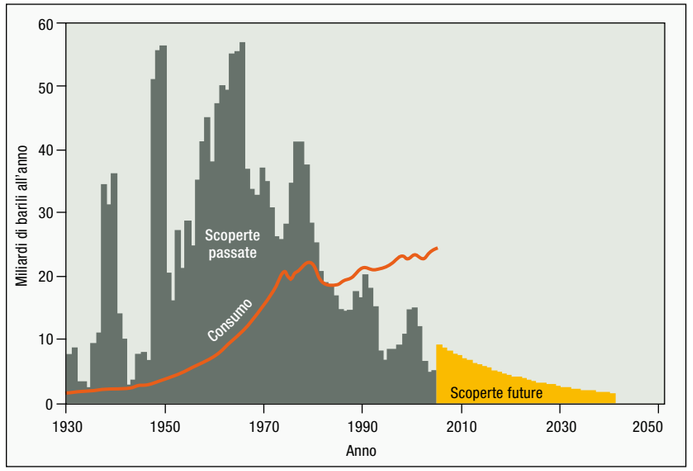
spesso sull'analisi economica del rapporto tra costi e benefici, in base a cui, almeno in teoria, le preferenze collettive dei cittadini si sarebbero riflesse democraticamente nelle scelte economiche.

I pochi scienziati che ancora si occupavano della diminuzione delle risorse non ricevettero più finanziamenti dalla National Science Foundation né dal Department of Energy (tranne che per studi sul miglioramento dell'efficienza energetica), perciò quasi tutti i migliori analisti furono costretti a lavorare a questi temi nel fine settimana, dopo il pensionamento o a titolo gratuito. La formazione in analisi energetica e in studio dei limiti della crescita scomparve dai piani di studio universitari, tranne rare eccezioni. Il concetto di limite continuò a riguardare varie questioni ambientali, come la scomparsa delle foreste pluviali e delle barriere coralline o il cambiamento climatico. Questi temi, però, venivano trattati come problemi specifici e non come parte di un problema più generale riguardante la relazione tra popolazione e risorse.

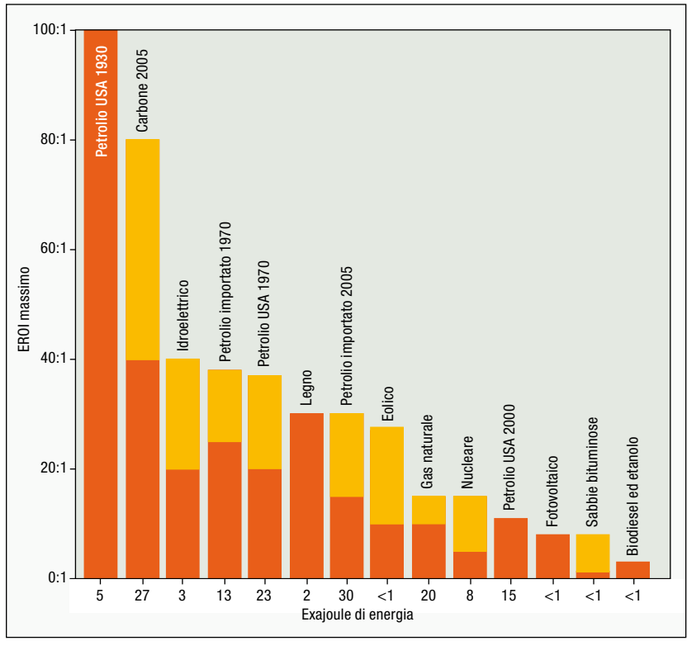
Uno sguardo più da vicino

Per una minoranza di scienziati però non ci sono mai stati dubbi sul fatto che la vittoria degli economisti fosse illusoria e basata su informazioni incomplete. Per esempio Cutler J. Cleveland, scienziato ambientale dell'Università di Boston, ha riesaminato nel 1991 lo studio di Barnett e Morse, scoprendo che il prezzo delle materie prime non era aumentato (nonostante si stessero intaccando le riserve di maggior qualità) perché durante il periodo analizzato dallo studio il prezzo reale dell'energia era sceso a causa del sempre maggiore consumo di petrolio, gas e carbone, i cui prezzi reali stavano scendendo. Quindi, anche se era aumentata la quantità di energia necessaria per ricavare un'unità di risorse, il costo delle risorse non era aumentato perché il prezzo dell'energia era diminuito.

Allo stesso modo, quando la crisi petrolifera causò una recessione all'inizio degli anni ottanta, ed Ehrlich e Simon fecero la famosa scommessa, il calo della domanda di tutte le risorse portò a un abbassamento dei prezzi e addirittura a un aumento della qualità di alcune risorse estratte, visto che solo le miniere di miglior qualità furono mantenute attive. Negli ultimi anni, invece, il prezzo dell'energia ha ricominciato ad aumentare, e in Asia è esplosa la domanda di materie prime: di conseguenza il prezzo di molti minerali è nettamente aumentato. Se Ehrlich avesse fatto la sua scommessa sui dieci anni appena trascorsi avrebbe accumulato una piccola fortuna, visto che i prezzi di quasi tutte le materie prime, comprese quelle su cui aveva scommesso, sono aumentati da due a dieci volte in risposta all'enorme domanda generata dalla Cina e al calo di qualità delle risorse estratte.



FUTURO AVARO DI GIACIMENTI. A livello globale, la velocità di scoperta di nuovi giacimenti di petrolio è scesa per decenni (*area in grigio*) e si prevede che scenderà ancora più velocemente nei prossimi anni (*area in giallo*). I consumi mondiali, al contrario, continuano a crescere (*linea rossa*). In futuro, dunque, la forbice tra offerta e domanda di petrolio dovrebbe allargarsi sempre di più. I dati sono stati resi disponibili dall'Association for the Study of Oil and Gas.



IL RITORNO ENERGETICO SULL'INVESTIMENTO (EROI) è il costo da sostenere per sfruttare una risorsa energetica; uno degli obiettivi è ricavare molto più di quanto si è investito. L'EROI della produzione statunitense di petrolio è sceso da 100:1 nel 1930 a 40:1 nel 1970, fino al 14:1 attuale. L'EROI della maggior parte delle fonti «verdi», come il fotovoltaico, è per ora molto basso. (Il colore chiaro indica un intervallo di possibili EROI dipendenti da condizioni variabili e dati incerti.) L'EROI non corrisponde necessariamente alla quantità di energia totale prodotta (in exajoule, cioè 10^{18} joule) da ogni risorsa.

Elaborazione «Le Scienze» (*grafici*)

Un ulteriore problema è che non c'è una definizione univoca di efficienza economica. Diversi ricercatori, tra cui gli autori di questo articolo, hanno notato che il consumo di energia (fattore non considerato nelle equazioni degli economisti) è molto più importante di capitale, manodopera o tecnologia per spiegare l'aumento di produzione industriale di paesi come Stati Uniti, Giappone o Germania. Secondo un'analisi di Vaclav Smil, negli ultimi dieci anni l'efficienza energetica dell'economia giapponese è diminuita del 10 per cento. Diverse analisi hanno dimostrato che la maggior parte delle tecnologie agricole richiede un uso intensivo di energia. In altre parole, non appena si effettuano analisi dettagliate dell'intero sistema, i ragionamenti sono molto più complessi e ambigui, e si nota che la tecnologia raramente funziona da sé, ma tende a richiedere un consumo elevato di risorse.

Analogamente, negli Stati Uniti la produzione di petrolio è calata del 50 per cento, come previsto da Hubbert. Il mercato non ha risolto i problemi perché, nonostante l'aumento dei prezzi e l'intensa attività di perforazione negli anni settanta e ottanta, la produzione di petrolio e gas in quello stesso periodo è stata inferiore. Inoltre, da allora non c'è più stata correlazione tra attività di perforazione e tassi di produzione.

Il modello dei limiti della crescita viene percepito come fallimentare anche da molti scienziati ambientali di spicco, perché le sue previsioni di inquinamento estremo e crollo della popolazione non si sono avverate. Ciò che pochi sanno, tuttavia, è che i risultati originali, basati sulla tecnologia informatica dell'epoca, erano facili da equivocare: sul grafico originale, infatti, riguardante il periodo tra 1900 e 2100, non c'erano le date. Se però le aggiungiamo ora, situando l'anno 2000 a metà dell'ascissa, allora si nota che le previsioni del modello sono quasi perfettamente realizzate nel 2008 (con poche e appropriate considerazioni). Ovviamente non è possibile conoscere l'attendibilità del modello per gli anni futuri, quando il suo comportamento è più dinamico.

Noi non sosteniamo che l'attuale struttura del modello dei limiti della crescita sia adeguata per i compiti che deve affrontare. Riconosciamo però che le sue previsioni non sono state smentite e, anzi, sembrano piuttosto esatte. Non ci risulta che ci siano altri modelli, fatti da economisti, altrettanto attendibili su un periodo così lungo.

ALTRE RISORSE A PICCO.
Il petrolio potrebbe non essere l'unica risorsa ad avere raggiunto il picco di produzione. In Sardegna, per esempio, i pescherecci commerciali catturano l'80 per cento di pesce in meno rispetto alla generazione passata.

Christian Science Monitor/Getty Images

Evitare Malthus

Anche il più accanito sostenitore della teoria delle risorse limitate deve riconoscere che le previsioni di Malthus non si sono avverate per il pianeta nel suo complesso, visto che la popolazione è

aumentata circa sette volte dai tempi del suo saggio e in certe aree del mondo continua ad aumentare provocando solo qualche sporadica carestia (spesso, però, producendo malnutrizione e povertà considerevoli). Come è stato possibile?

La risposta più ovvia è che la tecnologia, unita all'economia di mercato o ad altri sistemi di incentivi sociali, ha aumentato enormemente le capacità di sostentamento della Terra. La tecnologia, tuttavia, è un'arma a doppio taglio i cui benefici possono essere attenuati dal paradosso di Jevons, secondo cui un aumento dell'efficienza porta spesso a un abbassamento dei prezzi, che a sua volta provoca un maggior consumo di risorse.

La tecnologia, inoltre, richiede energia per funzionare. Come già notato agli inizi degli anni settanta da Odum e Pimentel, le alte rese agricole moderne sono raggiunte soprattutto grazie a un maggior impiego di combustibili fossili, necessari per coltivare, fertilizzare, diserbare, essiccare e così via. Ci vogliono dieci calorie di petrolio per produrre una caloria del cibo che mangiamo. Il combustibile impiegato si suddivide quasi equamente tra coltivazione, trasporto e lavorazione, cottura. L'effetto finale è che circa il 19 per cento dell'energia usata negli Stati Uniti finisce nel sistema alimentare. Malthus non avrebbe potuto prevedere un simile aumento della produzione alimentare grazie al petrolio.

Allo stesso modo, i combustibili fossili sono stati fondamentali per la crescita di molte economie: Stati Uniti ed Europa negli ultimi due secoli, Cina e India oggi. L'espansione delle economie di quasi tutti i paesi in via di sviluppo ha una relazione quasi lineare con l'uso di energia, e quando l'energia viene meno quelle economie si riducono in proporzione, come accadde per esempio a Cuba nel 1988. (C'è stata, tuttavia, una notevole espansione dell'economia statunitense dopo il 1980 senza un concomitante aumento dell'uso di energia. Si tratta di un'eccezione, probabilmente dovuta al fatto che gran parte della produzione industriale pesante è stata spostata all'estero, mentre negli altri paesi è rimasta interna.) Quindi la maggior parte della ricchezza è generata grazie a un uso sempre più intenso del petrolio e di altri combustibili. Di fatto, ogni persona negli Stati Uniti e in Europa ha, in media, tra 30 e 60 «schiavi energetici» al suo servizio, ossia macchine che estraggono le risorse al suo posto e la cui potenza è paragonabile a quella di molti robusti lavoratori.

Dunque, un punto da considerare per il futuro sarà il livello di abbondanza ed economicità dei combustibili fossili e di altre fonti energetiche. Petrolio e gas naturale forniscono due terzi dell'energia usata globalmente, mentre il carbone copre il 20 per cento. Non viviamo nell'era dell'informazione né in quella post-industriale, e non siamo (ancora) in quella solare. Questa è piuttosto l'era del petrolio e, sfortunatamente, è destinata a finire presto: sembra infatti che la produzione di petrolio e gas abbia già raggiunto, o raggiungerà presto, il suo massimo. Gli Stati Uniti hanno raggiunto il picco di produzione nel 1970, e ora lo hanno raggiunto almeno 18 dei 50 più importanti produttori. Ormai non ci si chiede se il picco si verificherà o meno, ma quando toccherà tutto il pianeta, che forma avrà e quanto ripida sarà la discesa dall'altro lato della curva.

L'altra grande questione riguardo il petrolio non è quanto ne rimanga da estrarre (ne rimane moltissimo), ma quanto sia estraibile con un significativo vantaggio energetico. L'EROI del petrolio statunitense è sceso da 100:1 nel 1930 a 40:1 nel 1970, per arrivare a 14:1 nel 2000. E queste cifre sono persino positive se le paragoniamo all'EROI relativo alla ricerca di nuovi giacimenti negli Stati Uniti, che, in base alle poche informazioni disponibili, raggiungerà l'1:1 entro pochi decenni.

Storicamente, la maggior parte delle riserve petrolifere del pianeta sono state scoperte grazie all'esplorazione di nuove regioni. I giacimenti di dimensioni eccezionali sono stati trovati in tempi relativamente brevi, e la maggior parte delle riserve conosciute è stata scoperta prima del 1980. Secondo Colin Campbell, geologo e sostenitore del picco del petrolio, «l'intero pianeta è stato perlustrato con tecniche di prospezione sismiche. Le conoscenze geologiche sono aumentate enormemente negli ultimi trent'anni, ed è sostanzialmente da escludere che rimangano da scoprire giacimenti di una certa importanza».

INIZIA L'ERA DELLE CODE?
Negli Stati Uniti e in importanti paesi produttori, la produzione di petrolio (*qui sotto, campi di estrazione*) ha già raggiunto il picco e sta diminuendo inesorabilmente, rendendo sempre più probabili file ai distributori, come quella ripresa nella foto a fronte, nella provincia cinese del Jiangxi.

Svetlana Tebenkova/Stockphoto

EyePress/AP Photo/LaPresse

A corto di energia

Oggi il mondo affronta enormi problemi connessi con la popolazione e le risorse. Questi temi sono stati discussi in maniera intelligente, e sostanzialmente corretta, in articoli realizzati dopo la metà del secolo scorso, ma sono scomparsi dal dibattito pubblico e scientifico, in parte a causa di una scarsa ricezione del loro messaggio e della validità di molte loro previsioni. Quasi tutti i libri di testo si concentrano più sugli effetti negativi dei combustibili fossili che sulle implicazioni della nostra esagerata dipendenza energetica e alimentare da essi. L'incapacità di portare le implicazioni del picco del petrolio, e di qualsiasi altra materia prima, nel dibattito scientifico e nell'insegnamento è una grave minaccia per la società industriale.

L'idea di un collasso di una parte consistente della civiltà è tanto estranea alla mentalità dei nostri leader che siamo quasi del tutto impreparati. Quanto ai grandi temi sanitari e ambientali, per esempio il fumo o l'alluvione di New Orleans, la storia dimostra che i primi impatti negativi precedono di alcuni decenni sia l'accettazione dell'opinione pubblica sia l'azione da parte dei politici.

Non c'è forma di trasporto, a parte le scarpe e la bicicletta, che non sia basata sul petrolio. Anzi, oggi anche le scarpe sono spesso realizzate con il petrolio. La produzione alimentare richiede quantità enormi di energia; abiti, mobili e molti farmaci sono prodotti a partire dal petrolio; e quasi tutti i posti di lavoro scomparirebbero senza il petrolio. Nelle università, però, il dibattito è assente, a parte le solite lagne sul prezzo della benzina. Pochi sanno che tra l'estate e l'autunno del 2008, in seguito a tre anni in cui la produzione di petrolio non è cresciuta, si stava per assistere a una ripetizione degli eventi degli anni settanta, alleviati solo dalla crisi finanziaria che ha ridotto la domanda di greggio.

I sostituti del petrolio sviluppati finora non riuscirebbero a soddisfare la domanda attuale, e molti hanno un rendimento energetico netto scarso. Nonostante il notevole potenziale, le fonti rinnovabili (esclusi l'idroelettrico e la tradizionale legna da ardere) attualmente forniscono meno dell'uno per cento dell'energia usata sia negli Stati Uniti sia nel resto del mondo. Inoltre la crescita annuale dell'uso dei combustibili fossili è in genere molto superiore a quella della produzione totale di eolico e fotovoltaico. Le nuove fonti di energia «verde» stanno quindi crescendo insieme a quelle tradizionali, invece di sostituirle.

Se vogliamo risolvere questi problemi, compreso il cambiamento climatico, è necessario riportarli al centro della formazione universitaria. Inoltre è necessario affrontare e smentire chi ne nega l'importanza, vista anche la scarsità di leader intellettuali che attualmente si occupano di temi del genere. Sarà poi necessario insegnare l'economia non solo da una prospettiva sociale, ma anche biofisica. Solo allora avremo qualche possibilità di capire e risolvere questi problemi. ■

Letture

La fine del petrolio a buon mercato. Campbell C. e Laherrere J., in «Le Scienze» n. 357, maggio 1998.

The Myth of Sustainable Development: Personal Reflections on Energy, Its Relation to Neoclassical Economics, and Stanley Jevons. Hall C.A.S., in «Journal of Energy Resources Technology», Vol. 126, n. 2, pp. 86-89, giugno 2004.

The Need to Reintegrate the Natural Sciences with Economics. Hall C.A.S. e altri, in «BioScience», Vol. 51, n. 8, pp. 663-673, agosto 2001.

I nuovi limiti dello sviluppo. Meadows D., Meadows D. e Randers J., Mondadori, Milano, 2006.

A Comparison of the Limits of Growth with 30 Years of Reality. Turner G.M., in «Global Environmental Change», Vol. 18, n. 3, pp. 397-411, agosto 2008.

Nuove strategie contro i superbatteri

Nella corsa alla scoperta di nuovi antibiotici gli scienziati usano strumenti e tattiche inediti

di Christopher T. Walsh e Michael A. Fischbach

IN SINTESI

- Batteri pericolosi stanno sviluppando resistenza agli antibiotici usati oggi con una rapidità superiore alla nostra capacità di inventare o scoprire nuovi farmaci.
- La ricerca sta esplorando ambienti estremi e indagando i genomi microbici per risolvere il problema.
- Nuovi metodi che colpiscono con precisione singoli organismi o li rendono inattivi senza ucciderli possono contribuire a spezzare il circolo vizioso della resistenza.

"Superbatterio attacca la città». Sembra un film dell'orrore, invece è il titolo di un articolo pubblicato il 26 ottobre 2007 dal «New York Post». Dodici giorni prima Omar Rivera, un dodicenne di Brooklyn, era morto dopo che una ferita che si era procurato giocando a basket era stata infettata da un ceppo di *Staphilococcus aureus* resistente alla meticillina (MRSA), un batterio diventato inattaccabile anche per una delle più potenti classi di antibiotici esistenti.

Solo dieci anni fa la possibilità che una persona sana contraesse un'infezione batterica incurabile poteva sembrare remota, ma ora è diventata realtà. Nel 2007 Monina Klevens dei Centers for Disease Control and Prevention ha riferito che negli Stati Uniti lo stafilococco MRSA provoca 19.000 vittime all'anno: più dell'AIDS. È un dato allarmante, perché quasi il 20 per cento delle persone con infezioni invasive di questo superbatterio muore, e le vittime sono sempre più persone giovani e sane infettatesi durante normali attività quotidiane. Un tempo il problema era circoscritto a ospedali e case di riposo, dove molti pazienti erano già vulnerabili a causa di un sistema immunitario compromesso. Ma anche i sopravvissuti a MRSA pagano un prezzo elevato: un paziente che si infetta durante un ricovero rimane in ospedale in media per altri dieci giorni, e costa altri 30.000 dollari.

La spesa complessiva che gli ospedali statunitensi sostengono ogni anno per curare le infezioni da MRSA è strabiliante, fra 3 e 4 miliardi di dollari, e lo stafilococco è solo uno dei patogeni che è sempre più difficile sconfiggere. La medicina sta perdendo la guerra contro batteri che un tempo erano considerati sconfitti. Per rovesciare il corso degli eventi, quindi, servono strategie che portino alla scoperta e alla produzione di nuovi antibiotici.

Resistenza ricorrente

La vicenda di MRSA è emblematica della rapidità con cui si può sviluppare la resistenza a un farmaco. Infatti i meccanismi naturali che causano la resistenza degli stafilococchi e di altri batteri rendono il problema pressoché inevitabile, creando un bisogno costante di nuovi antibiotici.

La meticillina, derivata della più famosa penicillina, è stata introdotta nel 1959 per curare infezioni di ceppi di specie batteriche, come *S. aureus* e *Streptococcus pneumoniae*, diventati resistenti proprio alla penicillina. Gli ospedali europei, tuttavia, hanno osservato ceppi meticillino-resistenti di *S. aureus* solo due anni dopo, e verso gli anni ottanta MRSA si è diffuso nelle strutture sanitarie di tutto il mondo. A metà degli anni novanta è emersa una nuova classe di infezioni da MRSA, quelle contratte «in contesti sociali» anziché in ambiente sanitario.

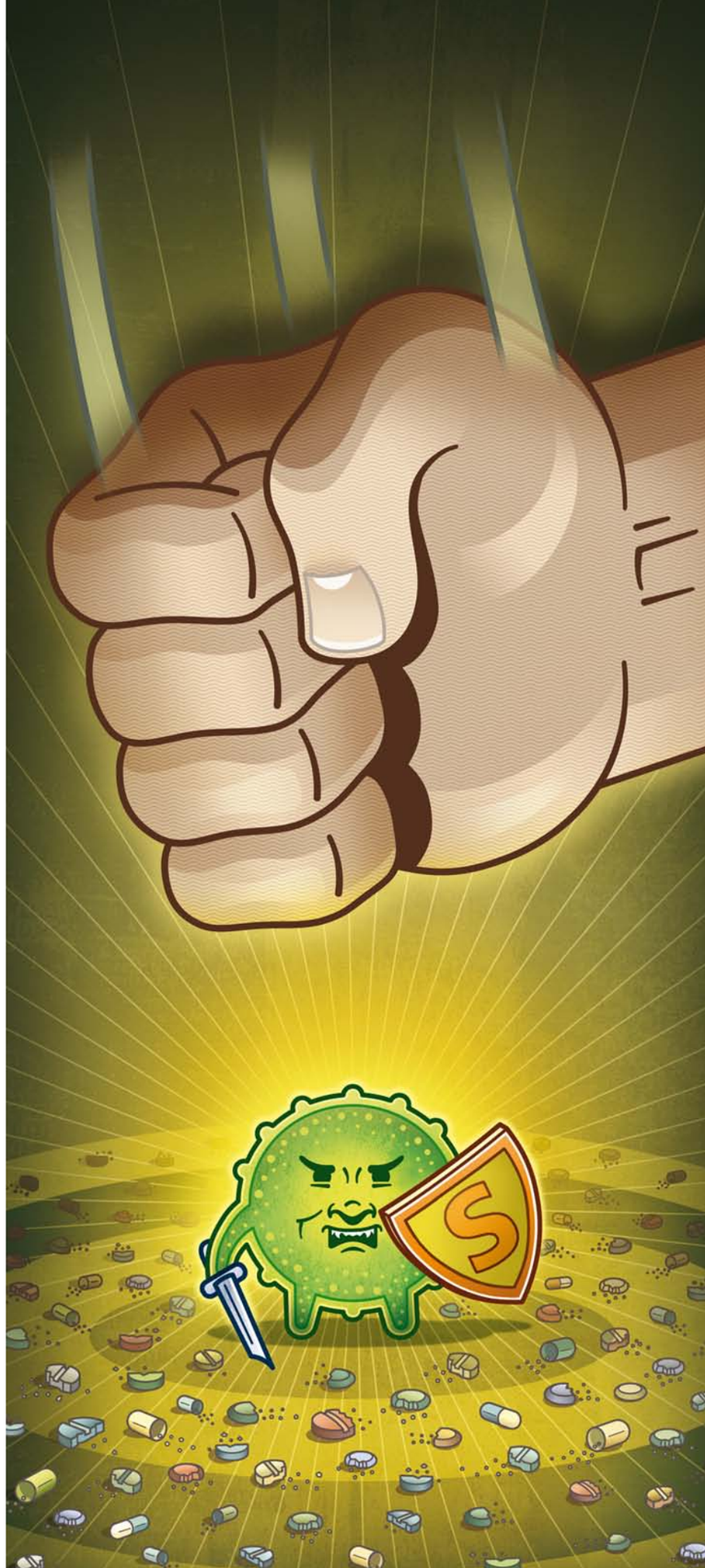
Curare l'infezione da MRSA è difficile anche perché se entra nel flusso sanguigno questo batterio si diffonde rapidamente. La sua caratteristica più dannosa è però la capacità di resistere a una classe principale di antibiotici chiamati beta-lattamici (che comprende le cefalosporine e tutte le varianti della penicillina) producendo un enzima che taglia e inattiva il farmaco. La resistenza ai beta-lattamici riduce le numerose armi a disposizione dei medici a uno piccolo gruppo di antibiotici, ognuno dei quali ha severi effetti collaterali. Inoltre alcuni ceppi di MRSA sono già diventati resistenti al più efficace di questi farmaci: la vancomicina.

La comparsa della resistenza alla vancomicina in batteri già resistenti alla meticillina illustra un problema che scoraggia i medici e i ricercatori che sviluppano nuove molecole: quando un antibiotico è introdotto nella pratica clinica, per la durata della sua vita utile ha inizio un conto alla rovescia determinato dalla selezione naturale. La presenza di un antibiotico crea un ambiente in cui un ceppo batterico casualmente resistente ha un improvviso vantaggio selettivo rispetto ai competitori.

La vancomicina è stata approvata dalla statunitense Food and Drug Administration nel 1958, e dopo la comparsa delle infezioni da MRSA era diventata la terapia principale contro le infezioni causate da questo batterio. Nel 2002, però, negli ospedali sono comparsi i primi ceppi di MRSA resistenti anche alla vancomicina. Questi ceppi, noti con l'acronimo VRSA, discendevano da MRSA che avevano acquisito un gruppo di cinque geni che si trovano in uno stesso tratto genomico, si spostano insieme e conferiscono resistenza alla vancomicina. Gli enzimi per cui codificano questi geni permettono a VRSA di sostituire il bersaglio della vancomicina sulla parete cellulare batterica con una variante che l'antibiotico non è più in grado di legare. Di conseguenza la vancomicina, un tempo indicata come «l'ultima spiaggia degli antibiotici», non inibisce più la crescita di VRSA.

Sostituire il bersaglio di un antibiotico è una delle tre strategie principali usate dai batteri per eludere la morte. Una seconda strategia coinvolge numerosi geni responsabili di resistenza agli antibiotici, come quello che rende MRSA resistente ai beta-lattamici. Questi geni codificano per un enzima che distrugge o modifica l'antibiotico inattivandolo. E ancora, altri geni che causano resistenza veicolano istruzioni per una pompa nella membrana cellulare che espelle le molecole antibiotiche entrate nel batterio, mantenendo la concentrazione interna di antibiotico sufficientemente bassa da evitare la morte.

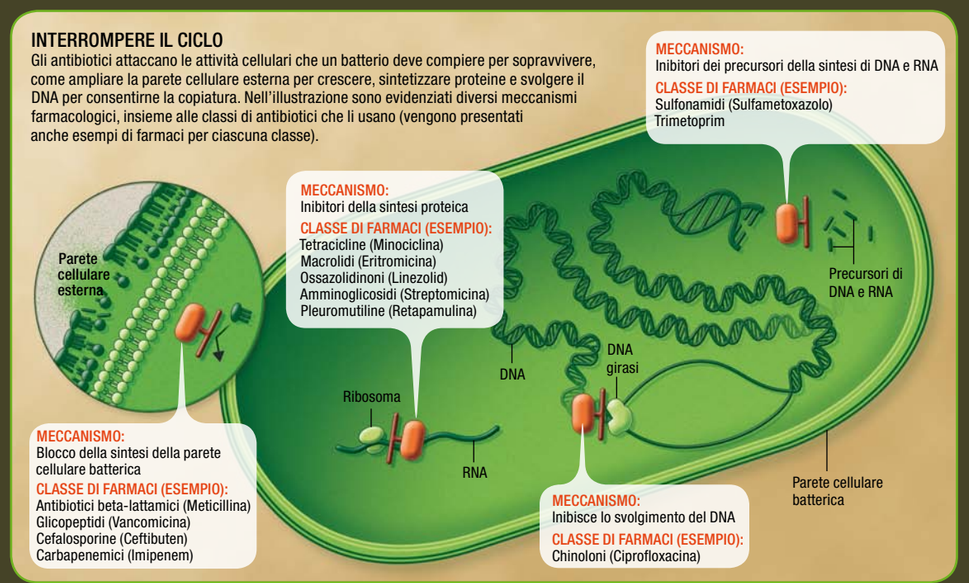
Quel è l'origine di questi geni? Alcuni emergono per mutazioni casuali degli stessi geni batterici, come la variante genica che sostituisce l'enzima bersaglio della ciprofloxacina e di altri antibiotici come il fluorochinolone con una forma resistente dello stesso enzima. Altri geni che codificano per



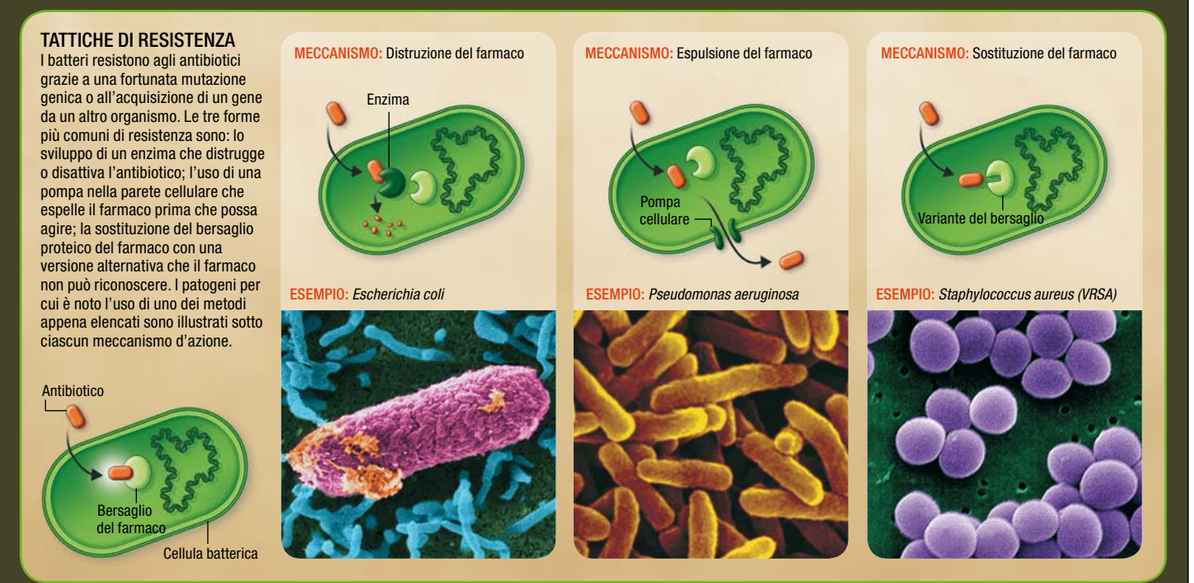
Peter e Maria Hoey

Come agiscono gli antibiotici usati oggi…

Gli antibiotici usati oggi dai medici puntano a uccidere i batteri interferendo con alcuni aspetti delle loro funzioni vitali essenziali. Da parte loro, i batteri hanno a disposizione diversi modi per distruggere o evitare i farmaci.



…e come si difendono i batteri



la resistenza ad antibiotici vengono presi da batteri vicini: per esempio, l'insieme di cinque geni che conferisce resistenza alla vancomicina arriva da un batterio che produce proprio questo antibiotico. Il batterio aveva bisogno di questi geni per proteggersi dalla sua stessa arma chimica, ma probabilmente altri batteri hanno acquisito quella difesa grazie a uno scambio costante di materiale genetico praticato dai batteri e chiamato «trasferimento genetico orizzontale».

Spesso questi trasferimenti coinvolgono molecole circolari di DNA chiamate plasmidi, che si comportano in modo simile a virus privi di rivestimento proteico. I plasmidi si trasferiscono da un batterio a una nuova cellula ospite, dove vengono riconosciuti come un frammento di DNA nativo per poi essere copiati dall'apparato di replicazione dell'ospite. Per favorire la propria diffusione, i plasmidi trasportano anche geni che promuovono la sopravvivenza del loro ospite, compresi quelli per la resistenza agli antibiotici. Si è scoperto che un plasmide isolato da batteri di un impianto per il trattamento dei liquami codificava per nove diversi geni di antibiotico-resistenza.

Il trasferimento genico orizzontale è stato osservato in azione anche nel 2002, quando MRSA, VRSA e un terzo batterio, *Enterococcus faecalis*, sono stato isolati in un paziente sottoposto a dialisi in un ospedale del Michigan. L'analisi genetica di questi ceppi ha dimostrato che un plasmide con i geni per la resistenza alla vancomicina, insieme a geni che codificavano per la resistenza ad altri tre antibiotici e a una classe di disinfettanti, era stato trasmesso da *E. faecalis* a MRSA, creando un nuovo ceppo di VRSA.

Purtroppo non sorprende che un paziente con una patologia cronica sia stato infettato da due diversi batteri patogeni, che poi hanno prodotto un terzo batterio. Spesso i reparti di terapia intensiva e le case di cura sono popolati da pazienti immunocompromessi sottoposti a intense profilassi antibiotiche, e questi pazienti sono il miglior terreno di coltura per nuovi batteri resistenti agli antibiotici. Medici e infermieri possono favorire in modo inconsapevole il trasferimento di batteri passando da un paziente all'altro per sostituire flebo e cateteri: ecco perché i programmi che incoraggiano il personale ospedaliero a disinfettarsi le mani tra le visite a due pazienti riducono il numero di infezioni.

VRSA, che non si è ancora ampiamente diffuso, è sensibile a un numero molto piccolo di antibiotici attualmente in uso, e ha un elevato tasso di mortalità. Ma un'altra classe di patogeni emergenti, i batteri gram-negativi multiresistenti, è ancora più temibile. Di fatto i batteri gram-negativi hanno due pareti cellulari, la più esterna delle quali impedisce l'ingresso a molti antibiotici. I patogeni gram-negativi resistenti a quasi tutti gli antibiotici usati negli ospedali comprendono ceppi del patogeno alimentare *Escherichia coli*, del suo parente *Klebsiella pneumoniae* e di altri due microrganismi opportunisti, *Pseudomonas aeruginosa* e *Acinetobacter baumannii*, che possono causare polmonite, meningite e batteriemia in pazienti ospedalizzati e immunocompromessi.

Chiaramente gli operatori sanitari devono fare tutto il possibile per prevenire la diffusione di batteri resistenti, e quindi dei geni che codificano per questa resistenza. Ma per completare gli sforzi e combattere microrganismi già resistenti servono anche nuovi antibiotici.

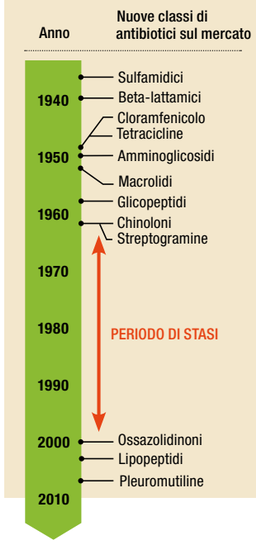
Tra la fine degli anni trenta e l'inizio degli anni sessanta si è vissuta l'età dell'oro degli antibiotici, un periodo durante il quale sono state introdotte quasi tutte le principali classi di questi farmaci usate oggi. Purtroppo, i quarant'anni trascorsi tra il lancio dei chinoloni, nel 1962, e l'approvazione degli ossazolidinoni, nel 2000, hanno rappresentato un intervallo privo di innovazioni, nel corso del quale non è arrivata nessuna nuova classe di antibiotici per uso terapeutico. Un motivo ha riguardato numerosi disincentivi economici che hanno dissuaso le aziende dall'investire nella ricerca, anche perché è una sfida molto impegnativa e con esigui margini di profitto rispetto a quelli di farmaci che migliorano la qualità della vita (chiamati farmaci *life-style*), che è necessario assumere per periodi prolungati nel caso di disturbi quali ipertensione o artrite. Un'altra ragione è che gli antibiotici di oggi sono stati scoperti grazie a tecniche ormai obsolete; trovarne di nuove richiederà nuove strategie di ricerca.

Cercare, trovare e sintetizzare

La maggior parte degli antibiotici in commercio viene prodotta da batteri e funghi oppure è derivata da questi prodotti naturali modificati chimicamente. I microrganismi usano i propri antibiotici l'uno contro l'altro come in una guerra chimica, e forse li secernono anche a concentrazioni più basse come molecole segnale. Tradizionalmente i ricercatori hanno cercato questi antibiotici naturali isolando microrganismi, spesso da campioni di terreno, facendoli crescere in laboratorio e poi estraendo le secrezioni dal terreno di coltura. Testando questi composti contro batteri patogeni, i farmacologi cercano singole molecole potenzialmente terapeutiche. Le aziende farmaceutiche hanno studiato milioni di estratti batterici seguendo questo metodo, e tuttavia sul mercato c'è solo una decina di classi di antibiotici naturali. Ne sono state

INNOVAZIONE ANTIBIOTICA

Nel 1962 i metodi tradizionali hanno prodotto quelle che sono state le ultime nuove classi di antibiotici per quarant'anni. Nuove tecnologie hanno dato frutti all'inizio di questo secolo.



GLI AUTORI

CHRISTOPHER T. WALSH è Hamilton Kuhn Professor di chimica biologica e farmacologia molecolare alla Harvard Medical School, ed è consulente o membro del consiglio di amministrazione di diverse aziende biotecnologiche e farmaceutiche. Le sue ricerche riguardano lo studio dei meccanismi usati dai microrganismi per sintetizzare antibiotici e altre molecole con potenziale valore terapeutico. Fino a poco tempo fa, MICHAEL A. FRISCHBACH era un giovane laureato del Dipartimento di biologia molecolare del Massachusetts General Hospital, dove ha iniziato a collaborare con Walsh. Di recente è diventato professore associato presso il Dipartimento di bioingegneria e scienze terapeutiche dell'Università della California a San Francisco.

Cortesia Walsh Lab (*Walsh*); cortesia Paul Straight (*Fischbach*); Tami Tolpa (*illustrazione, questa e pagina a fronte*)

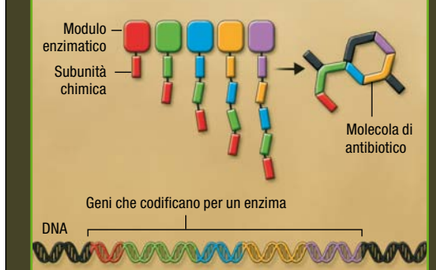
Gary Gaugler/Photo Researchers, Inc. (*E. coli*); Stem Jems/Photo Researchers, Inc. (*P. aeruginosa*); cortesia Janice Haney Carr, Centers for Disease Control and Prevention (*S. aureus*)

Estrarre geni per sintetizzare farmaci

La maggior parte degli antibiotici usati oggi sono prodotti dai batteri stessi. In natura, questi composti funzionano come armi chimiche contro i rivali. È possibile trovare o modificare un numero più grande di queste armi naturali in modo da renderle più utili, applicando tecniche per l'analisi dei genomi e la manipolazione di geni.

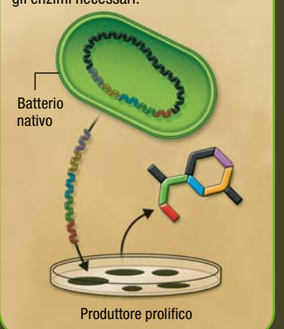
A CACCIA DI GENI

I batteri producono antibiotici naturali grazie a catene di montaggio enzimatiche organizzate in moduli, ciascuno dei quali aggiunge componenti successivi. Questi enzimi sono codificati da gruppi di geni. Gli scienziati possono analizzare interi genomi di numerosi batteri diversi alla ricerca di gruppi da cui potrebbero arrivare nuovi antibiotici. All'interno delle cellule non tutti i gruppi di geni in questione sono attivi, quindi l'unico modo per identificare questi antibiotici «criptici» è andare a caccia nel genoma.



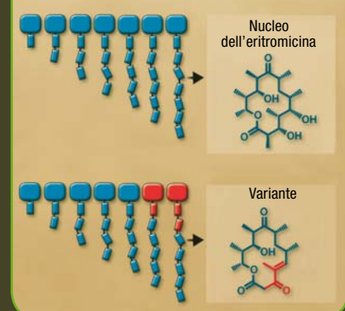
SPOSTARE I GENI

Quando un composto ad attività antibiotica appena scoperto è silente nel batterio che lo sintetizza, o viene prodotto in quantità non sufficienti a sfruttare il batterio come «fabbrica» del farmaco, gli scienziati possono trasferire in un organismo più adatto l'intero gruppo di geni che codifica per gli enzimi necessari.



MODIFICARE I GENI

Per superare la resistenza opposta dai batteri, un farmaco si può modificare ingegnerizzando geneticamente l'organismo che lo produce, in modo da indurre il microrganismo a usare nuovi moduli enzimatici. In una serie di esperimenti gli scienziati hanno miscelato e accoppiato geni per produrre 50 varianti del nucleo della molecola eritromicina, che poteva portare a nuove versioni del farmaco.



scoperte anche altre, ma per ragioni diverse, tra le quali una debole attività antibiotica e una tossicità di difficile gestione, nessuna è prescritta dai medici con continuità.

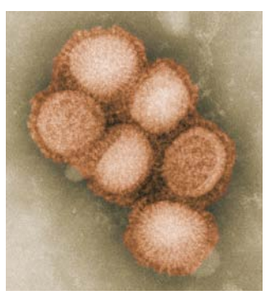
Questi metodi hanno funzionato bene durante l'età dell'oro degli antibiotici, ma ormai sono stati sfruttati tutti i vantaggi possibili. Nonostante i continui sforzi delle aziende farmaceutiche negli ultimi cinquant'anni, la velocità con cui si scoprono nuovi composti è diminuita. Un motivo frustrante è il fenomeno della riscoperta: visto che la maggior parte dei microrganismi produttori di antibiotici forma spore che viaggiano in tutto il mondo – e i geni responsabili della produzione si possono trasferire orizzontalmente, proprio come quelli per l'antibiotico-resistenza – molti microrganismi diversi producono le stesse sostanze. Secondo una recente stima, per esempio, circa un ceppo ogni 250 dell'ordine di batteri produttori più sfruttato, gli attinomiceti, produce tetraciclina. Anche se l'elevato tasso di riscoperta ha portato alcuni ricercatori a concludere che «la vena d'oro» degli antibiotici è stata esaurita, di recente lo studio dei genomi batterici ha messo in dubbio questa tesi, suggerendo la necessità di individuare nuove tattiche.

Spesso però i progressi tecnologici portano alla rinascita di una vecchia disciplina, e la scoperta di antibiotici sembra vicina a questa nuova vita. Le strategie attuali per lo sviluppo di nuovi farmaci ricadono in due categorie: la modifica di quelli già esistenti e la scoperta di sostanze totalmente nuove. La modifica di antibiotici prodotti da microrganismi porta a farmaci «semisintetici», in cui la parte attiva è intatta, mentre il resto del composto è stato alterato. Un esempio recente di questo approccio riguarda la classe delle tetracicline, cioè antibiotici che inibiscono il funzionamento dei ribosomi, le strutture che sintetizzano le proteine. Spesso la resistenza alle tetracicline è causata da una pompa nella membrana batterica che espelle questi antibiotici prima che possano agire, creando un serio problema per il trattamento di batteri gram-negativi resistenti a ogni farmaco.

Alcuni scienziati della Wyeth hanno sintetizzato una tetraciclina, la tigeciclina, che non è espulsa dalle cellule bersaglio. Approvata dalla FDA nel 2005, la tigeciclina è usata contro un gran numero di patogeni resistenti alla tetraciclina, anche se il suo impiego è limitato a contesti sanitari perché si deve somministrare per endovena. Purtroppo è già stato osservato un fenomeno di resistenza in ceppi del batterio *A. baumannii*, e solo il passare del tempo ci dirà con quale velocità si diffonde la resistenza a questo antibiotico.

COMBATTERE L'INFLUENZA

Gli antibiotici non hanno effetto su virus come quello del nuovo ceppo influenzale A (H1N1) mostrato qui sotto, ma nel caso di una pandemia provocata da questo patogeno è probabile che la maggior parte dei decessi sia provocata da infezioni batteriche secondarie che causano polmonite. L'influenza indebolisce le difese delle vittime, lasciandole vulnerabili nei confronti di batteri opportunisti. Quando MRSA o altri batteri resistenti causano polmonite, una situazione già critica diventa più difficile da trattare e più letale.



Tami Tolpa (*illustrazioni*); C.S. Goldsmith e A. Balish, Centers for Disease Control and Prevention (*H1N1*)

Ampliare le ricerche

Agli albori della scoperta degli antibiotici, i batteri che vivono nel terreno sono stati una fonte tanto ricca di composti da indurre gli scienziati a non allargare troppo il raggio d'azione. La ricerca di composti innovativi in ambienti nuovi e in organismi trascurati sta portando a nuove molecole di antibiotici i cui meccanismi d'azione sono diversi rispetto alle attuali classi di farmaci quanto basta per evitare fenomeni di resistenza.

ORGANISMI MARINI

Gli ambienti estremi sono un ottimo posto per cercare composti chimici insoliti, perché gli organismi che li producono reagiscono a condizioni e minacce insolite. Un antibiotico nuovo e potente chiamato abissomicina, per esempio, è prodotto dal batterio *Verrucosispora* (*in coltura, a sinistra; spore, a destra*), che vive nel Mar del Giappone a una profondità di quasi 300 metri.

MICRORGANISMI MUTUALISTI

La cooperazione porta alla specializzazione, e gli organismi che partecipano a relazioni di tipo mutualistico producono molecole altamente specifiche per un dato bersaglio. Un fungo che vive sul maggiolino dei pini aiuta questo insetto a digerire la polpa del legno. In cambio, il maggiolino ospita un batterio che produce un potente agente antifungino, che uccide i funghi antagonisti ma non il fungo partner del maggiolino stesso.

PRODUTTORI NON COLLABORATIVI

Alcuni batteri sono prolifici produttori di nuovi tipi di antibiotico, ma sono poco propensi a crescere in laboratorio o in condizioni artificiali. *Stigmatella aurantiaca* (*a sinistra*), per esempio, produce una molecola simile a un antibiotico. Ma come i suoi compagni del gruppo dei mixobatteri è difficile da coltivare. Con l'aiuto di nuovi strumenti che permettono di trasferire i geni di interesse in organismi che si comportano da produttori più efficienti, si potranno studiare famiglie di batteri ignorate fino a oggi per la ricerca di nuove molecole.

Cortesia Roderich Süssmuth e Hans-Peter Fiedler (*Verrucosispora*; cortesia USDA Forest Service (*maggiolino dei pini*); David White, colorato da Yves Brun, copertina del «Journal of Bacteriology», Vol. 185, n. 4, febbraio 2003 (*S. aurantiaca*)

Invece di modificare chimicamente antibiotici di origine batterica quali penicillina, vancomicina ed eritromicina, si possono modificare i farmaci alterando geneticamente gli organismi che li producono. La maggior parte degli organismi sintetizza antibiotici usando grandi catene di montaggio enzimatiche, chiamate «moduli», ciascuna delle quali aggiunge un «mattone» alla molecola in fase di crescita. Producendo cambiamenti genetici che alterano particolari moduli, i ricercatori inducono gli organismi a produrre antibiotici che differiscono per un singolo componente in una specifica posizione. La Kosan, azienda di recente acquistata dalla Bristol-Myers Squibb, ha applicato questa tecnica di ingegneria genetica alla sintesi di numerosi derivati dell'antibiotico eritromicina difficili da produrre con la sintesi chimica tradizionale.

È più probabile che organismi di ambienti estremi producano antibiotici non ancora scoperti

Anche se la modifica di antibiotici già disponibili si è rivelata una strategia produttiva, ancora più auspicabile sarebbe la scoperta di nuove classi di antibiotici, perché avrebbero minori probabilità di sperimentare il rapido aumento di resistenza, che invece colpisce le generazioni di antibiotici successive alla prima.

Analizzare i genomi

Negli ultimi anni gli sforzi dei ricercatori si sono concentrati sull'identificazione di enzimi necessari ai batteri per sopravvivere, nella speranza di trovare molecole che inibiscono questi enzimi, per poi trasformarle in farmaci. Prima però si deve stabilire quale effetto potrebbe avere sul batterio la perdita di un enzima. Solo dopo aver decifrato il genoma di un batterio, cioè dopo aver letto l'intera sequenza del suo DNA, gli scienziati possono inattivare i geni che codificano per certi enzimi in modo da capire se il microrganismo è in grado di sopravvivere in loro assenza.

Per ora questo approccio per identificare nuovi bersagli enzimatici non ha portato a nuovi antibiotici, tuttavia potrebbe dare frutti negli anni a venire. Una delle sfide principali è la formidabile barriera costituita dalla parete batterica: una piccola molecola capace di inibire un importante enzima batterico sarebbe inutile se non fosse in grado di raggiungere il suo bersaglio dentro la cellula. Invece di cercare i punti deboli dei patogeni, un'altra strategia per la scoperta di nuovi antibiotici riguarda lo studio di microrganismi produttori di antibiotici. E anche in questo caso la genomica viene in nostro soccorso.

Le prime sequenze genomiche di batteri che producono antibiotici, ottenute nel 2002, hanno scoperto un mistero: questi microrganismi, appartenenti alla classe degli attinomiceti, avevano da 25 a 30 gruppi di geni che sembravano istruzioni per moduli enzimatici con cui produrre molecole simili ad antibiotici, ma apparentemente i batteri non sfruttavano la maggior parte di quei geni. Coltivati in laboratorio, i microrganismi sintetizzavano solo una o due molecole.

Per capire se questi geni dormienti codificano per nuovi antibiotici, insieme a diversi nostri collaboratori della Harvard Medical School e del Broad Institute, stiamo sequenziando il genoma di altri 20 ceppi di attinomiceti. A questo scopo, stiamo applicando sofisticati algoritmi informatici per identificare qualsiasi gene che potrebbe contenere istruzioni per la sintesi di moduli produttori di antibiotici. Inoltre lo studio delle sequenze genomiche che circondano questi moduli potrebbe aiutare a scoprire i meccanismi regolatori con cui le cel-

lule stabiliscono quando produrre un antibiotico. Con queste due informazioni possiamo ingegnerizzare le cellule in modo da attivare i geni desiderati, e quindi testare l'attività antibiotica delle molecole misteriose.

Invece di forzare i batteri a produrre i loro antibiotici a richiesta, un gruppo di ricercatori dell'Università della Saarland, in Germania, ha spostato i geni antibiotico-produttori in altri batteri che sembrano più adatti. Rolf Müller e colleghi lavorano con mixobatteri che, analogamente agli attinomiceti, sono prolifici produttori di antibiotici. Visto che i mixobatteri sono più difficili da coltivare in laboratorio rispetto agli attinomiceti, sono stati fatti meno sforzi per testarli nella produzione di nuovi antibiotici.

Müller ha aggirato il problema spostando geni coinvolti nella produzione di una molecola simile a un antibiotico dal mixobatterio *Stigmatella aurantiaca* al batterio *Pseudomonas putida*, un ceppo più facile da crescere. In effetti, *P. putida* viene comunemente usato per la produzione di enzimi utili all'industria. Risolvendo due sfide chiave – trovare un batterio ospite geneticamente manipolabile che ha le infrastrutture metaboliche necessarie alla produzione di antibiotici e sviluppare tecniche per spostare grossi frammenti di DNA da un microrganismo a un altro – il lavoro di Müller ha aperto la porta alla scoperta e alla produzione di nuovi antibiotici dai mixobatteri, suggerendo che uno sforzo a grande scala per il sequenziamento del genoma di questi batteri sarebbe un affare.

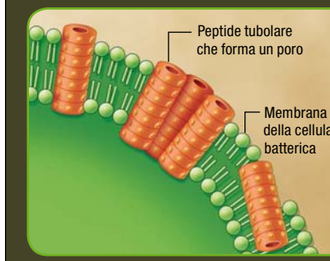
Oltre a esaminare microrganismi del suolo poco studiati, i ricercatori possono concentrarsi su ambienti ecologici inesplorati e potenzialmente redditizi, perché è più probabile che organismi che vivono in contesti insoliti producano antibiotici non ancora scoperti. Roderich Süssmuth e colleghi dell'Università di Tubinga hanno fatto proprio una scoperta del genere: hanno individuato un nuovo antibiotico, chiamato abissomicina, prodotto da un attinomicete isolato da un campione di sedimenti prelevato a una profondità di 289 metri nel Mar del Giappone. Un altro gruppo che studia batteri marini – Bradley Moore, William Fenical e colleghi dello Scripps Institute of Oceanography di La Jolla – ha sequenziato il genoma di due ceppi di attinomiceti sconosciuti. Questi genomi mostravano un diverso insieme di geni per la produzione di antibiotici e molecole correlate, un'ulteriore prova del potenziale dei batteri marini nella produzione di nuove classi di antibiotici.

Un approccio diverso rispetto all'esplorazione di nuovi ambienti ecologici riguarda microrganismi che partecipano a fenomeni di mutualismo, cioè a interazioni da cui entrambe le parti traggono beneficio. Per esempio è noto che l'insetto soprannominato «maggiolino del pino» (*Dendroctonus frontalis*) trasporta un fungo che digerisce l'interno dei pini. Tuttavia, per lungo tempo è rimasto un mistero in che modo il maggiolino protegga il suo fungo da un ceppo fungino antagonista che compete con il primo per il cibo. Di recente però Cameron Curie, Jon Clardy e i loro gruppi di ricerca all'Università del Wisconsin a Madison e alla Harvard Medical School hanno scoperto che il maggiolino trasporta un secondo microrganismo mutualistico, un attinomicete, che produce un agente antifungino potente e sconosciuto. Questa molecola uccide il fungo antagonista ma non quello mutualistico.

Gli scienziati possono modificare i farmaci alterando geneticamente gli organismi che li producono

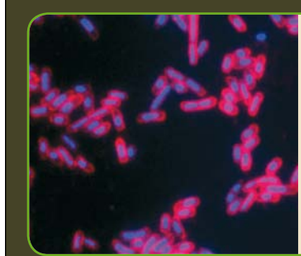
Nuove strategie per sconfiggere i batteri

Oltre a migliorare gli antibiotici esistenti e a cercare nuove molecole con effetti simili a quelli degli antibiotici, i ricercatori stanno anche studiando nuovi metodi per uccidere o rendere inoffensivi i batteri patogeni. Molti di questi approcci hanno l'ulteriore vantaggio di evitare l'innesco di meccanismi che di solito portano a resistenza.



FARE BUCHI
Invece di aggredire enzimi batterici o processi vitali, tubuli che aprono pori nella membrana cellulare uccidono il microrganismo limitandosi a perforare l'involucro della cellula batterica. Piccole proteine presenti in natura, le defensine, svolgono una funzione simile nei vertebrati per difenderli dai microrganismi. Diversi gruppi di ricerca stanno sviluppando frammenti proteici sintetici, capaci di autoassemblarsi in tubuli all'interno delle membrane batteriche.

RESTRINGERE IL BERSAGLIO
I batteriofagi (*in verde*) sono virus che infettano i batteri (*in blu*), in genere preferendo un solo ospite. I fagi sono stati studiati a lungo per testarne il potenziale impiego contro i batteri patogeni, ma sono anche un esempio del principio alla base dei cosiddetti nuovi farmaci «a spettro ridotto». Questi farmaci hanno come bersaglio un unico patogeno, e in questo modo non colpiscono le cellule umane e i batteri che non sono causa di malattie per l'uomo.



SOPPRIMERE SENZA UCCIDERE
Risparmiare un patogeno privandolo però della capacità di causare una malattia è un modo di curare una patologia senza favorire la resistenza agli antibiotici. Un esempio di questo approccio è dato dal batterio *E. coli* (*in rosso*), geneticamente ingegnerizzato in modo da imitare le cellule dell'intestino umano. Quando vengono somministrati, questi *E.coli* innocui assorbono la mortale tossina Shiga (*in blu*) prodotta da un altro microrganismo.

Lee D. Simon/Photo Researchers, Inc. (*batteriofagi*); fonte: *Designer probiotics for prevention of enteric infection*, di Adrienne W. Paton, Renato Morona e James C. Paton, in «Nature Reviews Microbiology», 2006; riprodotto con il permesso di Macmillan Publishers Ltd (*E. coli modificato*); Tami Tolpa (*peptide tubolare*)

Jörn Piel, dell'Università di Bonn ha dimostrato che una specie diversa di maggiolino e una spugna marina ospitano simbionti batterici che producono molecole antibiotiche affini. Sempre in Germania, Christian Hertweck dell'Hans-Knöll Institut di Jena ha scoperto un fungo che trasporta il proprio batterio simbionte, produttore di una molecola antibiotica battezzata rizoxina.

E in effetti anche la podofillotossina e la camptotecina, due farmaci anticancro ampiamente usati e per molto tempo ritenuti di origine vegetale, sono in realtà prodotti da funghi che vivono all'interno di piante. Lo studio dei microrganismi simbionti sta muovendo i suoi primi passi, tuttavia questi organismi rientrano tra le fonti più promettenti di antibiotici di origine naturale, e forse comprendono composti che definiscono nuove classi di antibiotici o che hanno nuovi meccanismi di azione. Inoltre le ricerche sul ruolo dei microrganismi simbionti che abitano il nostro organismo stanno producendo nuovi approcci alle cure antibiotiche.

Difendere gli alleati

Gli esseri umani, come gli insetti e le spugne, ospitano un'ampia varietà di batteri simbionti che svolgono una serie di funzioni utili: dall'aiutarci a digerire il cibo a promuovere un adeguato sviluppo del nostro sistema immunitario. Purtroppo, tutti gli antibiotici venduti oggi equivalgono ad armi spuntate: non uccidono solo i patogeni che provocano infezioni, ma anche i batteri che abitano il nostro intestino. In alcuni casi questa distruzione della microflora intestinale apre la strada a un ceppo diverso di batteri nocivi, come *Clostridium difficile*, capace di replicarsi e causare una nuova infezione «secondaria» che a volte può essere più pericolosa della prima.

Tra le tecniche utili per impedire le infezioni batteriche c'è l'impiego di microrganismi «amici» o di sostanze che promuovono la crescita di microrganismi mutualistici, in modo che questi ultimi abbiano la meglio sui patogeni. Anche se trattamenti probiotici del genere permettono di evitare l'uso generalizzato di antibiotici che favorisce la resistenza, i probiotici non si sono mai dimostrati efficaci nella cura di un'infezione.

Tuttavia, la crescente consapevolezza del fatto che la microflora naturale del nostro intestino aiuta a evitare le infezioni ha portato a una nuova strategia per la scoperta di antibatterici: sviluppare farmaci a spettro ristretto ideati per uccidere il patogeno che provoca l'infezione, lasciando inalterata la restante popolazione di batteri mutualistici. Per esempio Neil Stokes e colleghi della Prolysis, azienda con sede a Oxford, hanno sviluppato di recente un nuovo potenziale antibiotico che uccide *S. aureus* e batteri simili, impedendone la divisione cellulare senza intaccare le funzioni degli altri batteri. Victor Nizet e Andrew Wang, dell'Università della California a San Diego, insieme a Eric Oldfield dell'Università dell'Illinois, hanno diretto un gruppo di ricerca che ha ampliato e sviluppato ulteriormente questo concetto. Questi scienziati hanno scoperto un farmaco che blocca la sintesi di una molecola di pigmento che contribuisce alla virulenza di *S. aureus*, inibendo quindi la capacità di *S. aureus* di far ammalare i suoi ospiti senza però uccidere il batterio.

Peter e Maria Hoey

Probabilmente gli approcci sperimentali che mirano a inibire la virulenza batterica hanno anche il vantaggio di evitare i meccanismi che generano resistenza. Se una cura non uccide un patogeno, la selezione naturale non può favorire i «sopravvissuti», ed è meno probabile che si sviluppino ceppi resistenti. Allo stesso modo l'approccio «a spettro ridotto» si basa sull'individuazione di un bersaglio che sia unico o fondamentale per quel batterio, ma che non sia presente in altri. Così, anche se alla fine il microrganismo bersaglio sviluppa resistenza nei confronti del farmaco, si tratta di una forma di resistenza che è improbabile si diffonda e torni utile ad altri patogeni.

Resta da vedere se queste terapie, individualmente o come parte di una combinazione di trattamenti, si riveleranno praticabili nella realtà. Questi farmaci dovrebbero richiedere test diagnostici rapidi e in grado di individuare il patogeno responsabile dell'infezione di un paziente. Simili test sono già stati messi a punto, ma il loro uso non è ancora diffuso. Antibiotici a spettro ristretto, pur con le loro limitate applicazioni, potrebbero anche essere poco attraenti dal punto di vista economico per le aziende farmaceutiche.

L'idea di antibiotici universali, tuttavia, non è più praticabile. Secondo un'opinione ampiamente diffusa durante gli anni sessanta e settanta, le malattie infettive erano sul punto di essere sconfitte. Più di recente, articoli pubblicati dalla stampa generalista hanno dichiarato che i batteri multiresistenti hanno causato la «fine degli antibiotici». Ora sappiamo che nessuna delle due affermazioni è vera: gli uomini potrebbero non vincere mai in modo definitivo questa corsa contro il tempo, ma per quanto riguarda il secolo passato le nuove terapie ci hanno permesso di essere un passo avanti rispetto ai patogeni. Ora dobbiamo compiere ogni sforzo possibile per conservare la supremazia. ■

➥ Letture

Antibiotics: Actions, Origins, Resistance. Walsh C., ASM Press, 2003.

Antibiotics at the Crossroads. Nathan C., in «Nature», Vol. 431, pp. 899-902, 21 ottobre 2004.

New Antibiotics from Bacterial Natural Products. Clardy J., Fischbach M.A. e Walsh C.T., in «Nature Biotechnology», Vol. 24, n. 12, pp. 1541-1550, dicembre 2006.

Superbugs. Groopman J., in «New Yorker», 11 agosto 2008.

Avventure nello spazio-tempo curvo

La possibilità di «nuotare» e «planare» nello spazio curvo vuoto mostra che, ancora dopo novant'anni, la teoria einsteiniana della relatività generale continua a stupire

di Eduardo Guéron

IN SINTESI

- Nella teoria della relatività generale la gravità emerge dalla curvatura dello spazio-tempo. Oggi, novant'anni dopo che Einstein sviluppò le equazioni della teoria, i fisici continuano a scoprirvi nuove sorprese.
- Per esempio in uno spazio curvo un corpo può apparentemente sfidare i fondamenti della fisica e «nuotare» nel vuoto senza doversi sospingere contro qualcosa o essere spinto da qualcosa.
- Lo spazio-tempo curvo permette anche una sorta di «effetto aliante», in cui un corpo può rallentare la caduta anche nel vuoto.

In una famosa serie di racconti degli anni quaranta il fisico George Gamow raccontò le avventure di un certo Mister Tompkins, un umile impiegato di banca che sognava mondi in cui strani fenomeni fisici si intromettevano nella vita quotidiana. In uno di questi mondi, per esempio, la velocità della luce era di appena 15 chilometri all'ora, il che metteva in scena i bizzarri effetti della relatività speciale einsteiniana già andando in bicicletta senza troppo sforzo.

Di recente ho immaginato di incontrare uno dei pronipoti di Mister Tompkins, Mister E.M. Everard, filosofo e ingegnere che porta avanti con successo la brillante tradizione del suo antenato. Mi ha raccontato di un'esperienza sbalorditiva che riguarda alcuni aspetti della teoria della relatività generale scoperti di recente e di cui ora vi riferirò. Nella sua storia straordinaria figurano lo spazio-tempo curvo, gatti che si girano a mezz'aria, un astronauta in pericolo che si salva nuotando a cagnolino nel vuoto... e forse Isaac Newton che si rigira nella tomba.

Attenzione: curve pericolose

In una remota regione del cosmo, Mister Everard era uscito dalla sua astronave per riparare un'antenna difettosa. Notò che le belle luci delle stelle lontane avevano un'immagine distorta, come se le stesse guardando attraverso una lente spessa. Sentì anche qualcosa che gli stiracchiava delicatamente il corpo. Sospettando di sapere che cosa stesse succedendo, prese dal cinturone degli attrezzi un puntatore laser e un barattolo di schiuma da barba, e accese i razzi sulla schiena per mettere alla prova la sua idea.

Guidandosi con il fascio laser sfrecciò in linea retta per 100 metri, si voltò a sinistra e percorse qualche decina metri, e infine tornò al punto di partenza tracciando un triangolo di schiuma come un aeroplano che forma scritte con il fumo. Poi misurò l'ampiezza degli angoli del triangolo con un goniometro e li sommò. Il risultato era maggiore di 180 gradi.

Per niente sconcertato da questa apparente violazione delle regole della geometria, Mister Everard ricordò con simpatia una birichinata non euclidea della sua infanzia, quando disegnò alcuni triangoli sul mappamondo nello studio dei suoi genitori. Anche lì gli angoli davano una somma maggiore di 180 gradi. Ne concluse che anche lo spazio attorno a lui doveva essere curvo come la superficie del mappamondo, a distanza di tanti anni e anni luce. La curvatura spiegava la distorsione nella luce delle stelle e l'effetto lievemente spiacevole di essere stiracchiato.

Così Mister Everard capì che stava sperimentando effetti da manuale della relatività generale. Vari esperimenti condotti in maniera più raffinata rispetto alle sue gite con la schiuma da barba avevano confermato da tempo questi effetti: materia ed energia fanno sì che spazio e tempo si incurvino, e la curvatura dello spazio-tempo fa sì che materia ed energia (come il suo fascio laser e la luce delle stelle) seguano traiettorie curve. I suoi piedi e la sua testa «volevano» seguire curve leggermente diverse, e la discrepanza aveva prodotto la sensazione di stiramento.

Meditando su questi fatti, Mister Everard premette il pulsante di accensione dei razzi, per tornare all'astronave... e non accadde nulla. Allarmato, vide che l'indicatore del carburante era a zero, e che si trovava a buoni (anzi, cattivi) 100 metri dal portellone. In effetti, lui e il suo triangolo di schiuma stavano andando alla deriva rispetto all'astronave a velocità costante.

Miracle Studios, www.miraclestudios.com (*tutte le illustrazioni*)

Lo spazio-tempo curvo

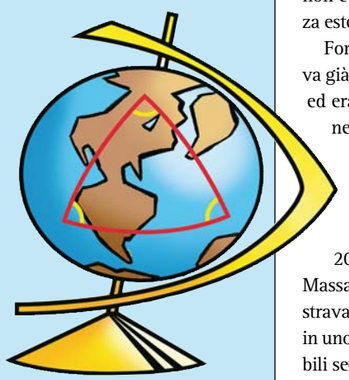
La relatività generale descrive la gravità come conseguenza della curvatura dello spazio-tempo, ma che cosa significa che lo spazio-tempo è curvo e quali sono le conseguenze di questo fatto?

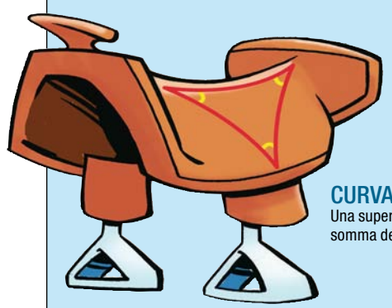
SPAZIO PIATTO

La geometria insegnata a scuola è euclidea, cioè la geometria dello spazio «piatto». In uno spazio di questo tipo la somma degli angoli interni di un triangolo è 180 gradi. Un piano bidimensionale, come la superficie di un tavolo da biliardo, è uno spazio piatto. E lo è anche, con ottima approssimazione, il mondo tridimensionale intorno a noi: se «disegniamo» un triangolo in aria usando tre fasci laser per tracciare i lati, gli angoli avranno come somma 180 gradi ovunque lo si faccia.

SPAZIO CURVO

La superficie di una sfera è un esempio di superficie bidimensionale curva. Su una sfera la somma degli angoli di un triangolo è maggiore di 180 gradi, il che caratterizza le regioni con curvatura «positiva». A noi che ci troviamo in tre dimensioni i lati del triangolo possono sembrare curvi, ma sono perfettamente rettilinei per una formica che cammini sulla sfera.



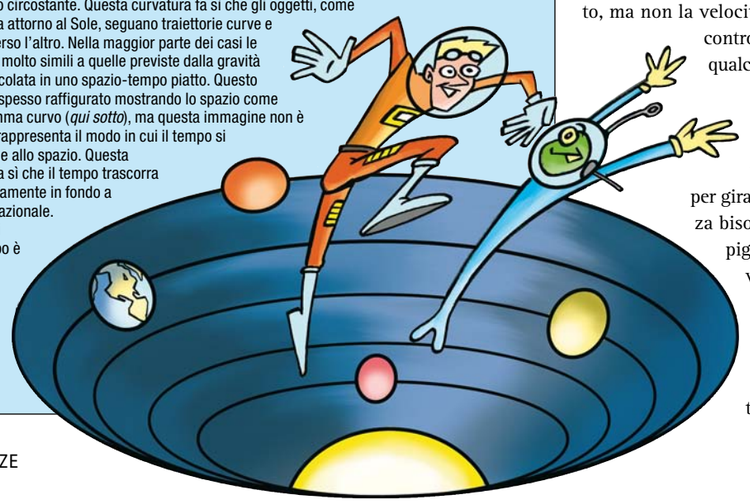


CURVATURA NEGATIVA

Una superficie a forma di sella ha una curvatura negativa: la somma degli angoli di un triangolo è minore di 180 gradi.

LA GRAVITÀ È PROVOCATA DALLA CURVATURA

Secondo la relatività generale, le concentrazioni di massa ed energia curvano lo spazio-tempo circostante. Questa curvatura fa sì che gli oggetti, come la Terra in orbita attorno al Sole, seguano traiettorie curve e cadano l'uno verso l'altro. Nella maggior parte dei casi le traiettorie sono molto simili a quelle previste dalla gravità newtoniana calcolata in uno spazio-tempo piatto. Questo concetto viene spesso raffigurato mostrando lo spazio come un foglio di gomma curvo (*qui sotto*), ma questa immagine non è completa; non rappresenta il modo in cui il tempo si deforma insieme allo spazio. Questa deformazione fa sì che il tempo trascorra appena più lentamente in fondo a un pozzo gravitazionale. Sapere come si deforma il tempo è essenziale per determinare correttamente le traiettorie.



Agendo con rapidità scagliò il goniometro, il laser, il barattolo di schiuma e tutti gli altri oggetti che portava nel cinturone dalla parte opposta rispetto all'astronave. Come prevede il principio della conservazione della quantità di moto, a ogni lancio riceveva una lieve spinta nella direzione opposta, verso l'astronave. Arrivò a sganciarsi i razzi e a scagliare via il peso inutile con la massima forza possibile. Quando non ebbe più nulla da lanciare, ahimè, si rese conto che era riuscito solo ad annullare il movimento iniziale che lo allontanava dall'astronave. Adesso stava fluttuando immobile rispetto all'astronave, ma ancora lontano. La situazione sembrava disperata: il suo insegnante di fisica alle superiori aveva spiegato che non è possibile accelerare un corpo senza una forza esterna o qualche espulsione di massa.

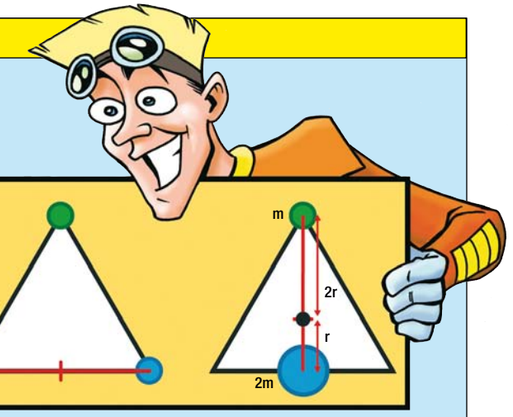
Fortunatamente, il nostro amico alla deriva aveva già appurato che si trovava in uno spazio curvo, ed era abbastanza preparato da sapere che alcune leggi di conservazione funzionano diversamente in uno spazio curvo rispetto allo spazio newtoniano piatto (con curvatura nulla) dei suoi giorni di scuola. In particolare, ricordava di aver letto un articolo di fisica del 2003 in cui il planetologo Jack Wisdom, del Massachusetts Institute of Technology (MIT), mostrava che un astronauta avrebbe potuto muoversi in uno spazio curvo in modi che sarebbero impossibili secondo le leggi newtoniane del moto, semplicemente compiendo i movimenti giusti con braccia e gambe. In altre parole, poteva nuotare. Non serviva nessun fluido su cui esercitare una spinta. Poteva nuotare a cagnolino nel vuoto.

Il trucco di Wisdom è simile al modo in cui un gatto, lasciato cadere a pancia in su, torce il corpo e ritrae ed estende le zampe in modo da girarsi e cadere in piedi. Le leggi della meccanica newtoniana permettono al gatto di cambiare l'orientamento, ma non la velocità, senza doversi sospingere contro qualcosa o essere spinto da qualcosa.

Gli astronauti a bordo della Stazione spaziale internazionale possono usare una variante del trucco del gatto per girarsi in assenza di gravità senza bisogno di sorreggersi a un appiglio. Nello spazio-tempo curvo della relatività generale un gatto o un astronauta possono prodursi in acrobazie più spettacolari. Il nostro eroe percorse la distanza per tornare all'astronave in poco più di un'ora: non è un primato olimpico, ma di certo è sufficiente a farlo sopravvivere per affrontare nuove avventure.

Perché la curvatura permette movimenti insoliti

Nello spazio piatto, un sistema isolato immobile non può spostare il proprio centro di massa, ma uno spazio curvo ha una scappatoia per eludere questa restrizione.



NELLO SPAZIO PIATTO IL CENTRO DI MASSA È BEN DEFINITO

Tre palle di massa *m* ai vertici di un triangolo equilatero hanno il centro di massa nel centro geometrico del triangolo (*punto nero*). Questa posizione può essere calcolata trovando il punto equidistante da tutti e tre gli angoli (*a sinistra*), ma può anche essere calcolata in due passaggi (*a destra*).

NELLO SPAZIO CURVO IL CENTRO DI MASSA È MAL DEFINITO

Immaginiamo ora che le tre palle si trovino in uno spazio curvo come la superficie di una sfera, e siano nei punti corrispondenti a Dakar, Singapore e Tahiti sulla Terra. Se si calcola il centro di massa delle palle cercando un punto equidistante, lo si trova vicino al Polo Nord (*a sinistra*). Ma se si calcola in due passaggi si trova una posizione vicina all'equatore (*a destra*). Questa ambiguità a proposito del centro di massa rende possibile «nuotare» in uno spazio curvo.

Lezioni di nuoto

Come funziona esattamente il fenomeno di Wisdom? Come fa un avventuriero come Mister Everard a nuotare nello spazio? Nello spazio piatto – il tipo di spazio dato per scontato nella meccanica newtoniana e anche nella relatività speciale - il centro di massa di un sistema isolato (per esempio l'astronauta più i razzi esauriti) non accelera mai. Supponiamo che Mister Everard abbia fissato un lungo cavo ai suoi razzi prima di lanciarli via e poi li riporti indietro riavvolgendo il cavo. Durante la manovra, mentre i razzi e l'astronauta prima si allontanano e poi si riavvicinano, il centro di massa del sistema rimane immutato. Alla fine lui e i suoi razzi si ritroverebbero nella posizione iniziale. Più in generale, Mister Everard non può spostarsi modificando ciclicamente la propria forma o struttura per poi ripristinarle.

Nello spazio curvo la situazione è diversa. Per capire perché, immaginiamo un alieno con due braccia e una coda, tutte estensibili e retrattili (*si veda il box a p. 79*). Per semplificare il ragionamento immaginiamo che tutta la massa dell'alieno sia concentrata alle estremità dei suoi tre arti, un quarto in ogni mano e l'altra metà sulla punta della coda. Fluttuando nello spazio piatto, l'alieno è spacciato. Se per esempio allunga la coda di due metri, le mani vanno in avanti di un metro e la punta della coda va indietro di un metro, lasciando immobile il centro di massa. Ritrarre di nuovo la coda riporta l'alieno nella posizione iniziale, proprio come Mister Everard e i suoi razzi inerti. Accade lo stesso se l'alieno cerca di stendere le braccia. Qualunque combinazione o successione di estensioni e contrazioni di arti venga provata dall'alieno, il suo centro di massa rimane immutato. Il massimo che può fare è usare il trucco del gatto (estendere gli arti, ruotarli, ritrarli e ruotarli nella posizione iniziale) per modificare la direzione in cui è rivolto.

Ma immaginiamo ora che il nostro alieno viva in uno spazio curvo, a forma di sfera. Per aiutarvi a visualizzarlo userò termini geografici per descrivere posizioni e direzioni sulla sfera. L'alieno parte dall'equatore, con la testa rivolta verso ovest e braccia e coda ritratte. Estende un braccio verso nord e uno verso sud, poi allunga la coda man-

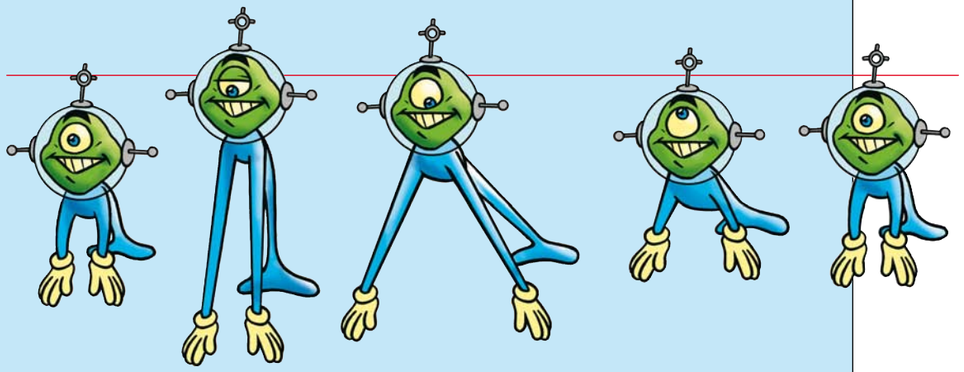
L'AUTORE

EDUARDO GUÉRON è professore associato di matematica applicata all'Universidade Federal do ABC, in Brasile (la «regione ABC» confina con la città di São Paulo). Guéron ha conseguito il dottorato nel 2001 all'Universidade Estadual de Campinas, ed è stato ricercatore visitatore al Massachusetts Institute of Technology dal 2003 al 2004. Studia la gravità, i sistemi dinamici e problemi relativi ai fondamenti della fisica. Guéron ama anche giocare con la sua bambina di quattro anni, e cercare di insegnarle che esistono diversi tipi di infinito.

Cortesia Eduardo Guéron (*Guéron*)

Un nuotatore nello spazio-tempo curvo

Una macchina, o un alieno con tre zampe, potrebbe nuotare in uno spazio-tempo vuoto curvo estendendo ciclicamente gli arti, divaricandoli, ritraendoli e riaccostandoli. Ogni ciclo di quattro azioni fa avanzare l'alieno nello spazio (qui accanto di una piccola distanza verso la parte alta della pagina) anche se non espelle propellente e non subisce l'azione di una forza.



tenendo le braccia tese ad angolo retto rispetto al corpo. Come nello spazio piatto, se la pesante punta della coda si sposta di un metro verso est, le mani si spostano di un metro verso ovest. Ecco la differenza cruciale data dalla sfera: l'alieno mantiene le braccia allineate con i meridiani della sfera, e la distanza tra essi è massima all'equatore. Dunque, quando le mani dell'alieno (più vicine del resto del corpo ai poli nord e sud della sfera) si spostano di un metro verso ovest, le sue spalle (sull'equatore) si spostano di più di un metro. Ora, quando l'alieno ritrae le braccia lungo un meridiano si ritrova con le mani spostate a ovest di più di un metro. Quando ritrae la coda, ripristinando la configurazione originaria del corpo, si ritrova sull'equatore spostato di una breve distanza a ovest della posizione originaria!

Lo spazio-tempo ha una curvatura estremamente piccola, tranne che in vicinanza di un buco nero. Così in pratica si dovrebbe nuotare per miliardi di anni per muoversi di un millimetro

Ripetendo ciclicamente questi movimenti, l'alieno striscia lungo l'equatore. La punta della coda e le mani insolitamente pesanti non sono essenziali per nuotare; se tutta la massa è concentrata in questi tre punti, è solo più facile calcolare di quanto si spostano le braccia in reazione all'estensione della coda. E in effetti, se la specie aliena dipendesse per la sua sopravvivenza dal nuoto nello spazio curvo, nel corso dell'evoluzione potrebbe sviluppare pesanti protuberanze alle estremità per migliorare l'efficienza del nuoto. Infatti la massa all'altezza del gomito non si estende lungo la curvatura quanto le mani, e quindi non genera altrettanto movimento extra del corpo.

Una sfera è una superficie bidimensionale, ma lo stesso principio funziona nello spazio-tempo curvo quadridimensionale. Modifiche cicliche della configurazione di un sistema possono portare a uno spostamento non nullo. Il nuotatore descritto da Wisdom aveva tre gambe telescopiche. Le gambe potevano essere ritratte o estese, e l'angolo tra esse poteva essere allargato o ristretto. L'alieno nuota estendendo le gambe, divaricandole, ritraendole e riaccostandole. Più è elevata la curvatura dello spazio-tempo in cui si trova, più lontano viene portato da questa sequenza di mosse.

Violazioni in movimento?

Anche se la cosa è sorprendente, il nuoto è una conseguenza diretta delle leggi fondamentali di conservazione, non una loro violazione. Il nuoto funziona perché il concetto stesso di centro di massa non è ben definito in uno spazio curvo. Supponiamo di avere tre palle da un chilogrammo disposte ai vertici di un triangolo equilatero. Su una superficie piatta il loro centro di massa è il centro geometrico del triangolo. Ci sono diversi modi per calcolare dove si trova il centro di massa, e ognuno dà lo stesso risultato. Si può cercare il punto equidistante dalle tre palle. Oppure si possono sostituire due delle palle con un'unica palla da due chilogrammi collocata nel punto medio tra esse, e poi calcolare il centro di massa di questa e della terza palla (il punto che si trova a un terzo del segmento che va dalla palla da due chilogrammi a quella da un chilogrammo). Il risultato sarà lo stesso. Questo fatto geometrico si traduce nella dinamica del sistema: il centro di massa di un sistema isolato non accelera mai.

Su una superficie curva, invece, procedimenti diversi possono non dare lo stesso risultato. Consideriamo il triangolo formato da tre palle di massa uguale e situate rispettivamente a Singapore, Dakar e Tahiti, tutte vicino all'equatore. Un punto equidistante dalle tre palle si trova vicino al Polo Nord. Ma se sostituiamo le palle a Singapore e a Dakar con una palla più pesante tra esse e poi calcoliamo la posizione che sta a un terzo della strada da quest'ultima palla a Tahiti lungo un cerchio massimo, il risultato sarà vicino all'equatore. Quindi il «centro di massa» su una superficie curva è ambiguo. Questo fatto geometrico fa sì che un sistema in uno spazio curvo possa muoversi addirittura quando è isolato da influenze esterne.

Ci sono altre sottigliezze. Un classico esercizio di fisica chiede di sommare le forze che agiscono su un corpo per determinare la forza risultante. Gli studenti di fisica esprimono le forze come vettori, disegnati come frecce. Per sommare due vettori li traslano in modo che la base di uno coincida con la punta dell'altro. In uno spazio curvo questo procedimento nasconde dei tranelli: la direzione di un vettore può mutare nel corso di una traslazione lungo un cammino chiuso. Quindi il procedimento per calcolare la forza totale che agisce su un corpo in uno spazio curvo è molto più complesso e può avere conseguenze inattese come il nuoto.

A prima vista alcuni effetti della gravitazione newtoniana possono sembrare simili al nuoto nello spazio-tempo. Per esempio un astronauta in orbita attorno alla Terra può alterare la propria orbita distendendosi e raggomitolandosi in momenti diversi. Ma questi effetti newtoniani sono diversi dal nuoto nello spazio-tempo: si verificano perché il campo gravitazionale varia da punto a punto. L'astronauta deve agire al momento giusto, come fa una persona su un'altalena per dondolare più velocemente. Non può modificare la sua orbita newtoniana ripetendo rapidamente movimenti molto piccoli, che gli permettono invece di nuotare nello spazio-tempo.

Il fatto che la possibilità di nuotare nello spazio-tempo non sia stata notata per quasi novant'anni ci ricorda che ancora oggi le teorie di Einstein non sono capite in modo completo. Anche se è improbabile che nel futuro prossimo si costruisca un razzo che nuota, il premio Nobel per la fisica Frank Wilczek, anch'egli del MIT, sostiene che il lavoro di Wisdom solleva domande profonde sulla natura dello spazio e del tempo.

In particolare, le scoperte di Wisdom hanno a che fare con la domanda se lo spazio sia di per sé un oggetto materiale (una posizione nota come sostanzialismo) o semplicemente un comodo strumento concettuale per esprimere le relazioni tra i corpi (una posizione nota come relazionalismo).

Per illustrare questi punti di vista, immaginiamo che Mister Everard stia fluttuando in un universo

Nuotare a cagnolino su una sfera

Il nuoto nello spazio-tempo curvo può essere compreso considerando un semplice nuotatore alieno bidimensionale che vive sulla superficie della sfera.

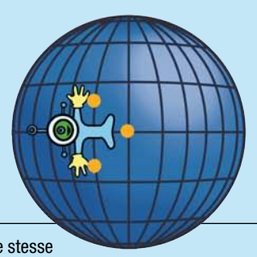
PRONTI
Il nuotatore è rivolto verso ovest, con le braccia puntate verso nord e sud e la coda rivolta verso est. Per semplificare la descrizione, immaginiamo che tutta la massa del nuotatore sia concentrata alle estremità dei suoi arti, un quarto in ogni mano e metà sulla punta della coda.

BRACCIA IN FUORI
Le braccia si allungano verso nord e sud (i punti in arancione indicano le posizioni originarie della mani). I movimenti uguali e opposti mantengono immutata la quantità di moto.

ESTENDERE LA CODA
Ora la coda si allunga verso est. Per mantenere la quantità di moto, le mani si spostano verso ovest. Essendo più vicine ai poli della sfera, le mani attraversano vari meridiani per percorrere la distanza coperta dalla pesante punta della coda, e le «spalle» si spostano della stessa quantità verso ovest lungo l'equatore.

BRACCIA IN DENTRO
Le braccia si ritraggono lungo i meridiani (che sono l'equivalente sulla sfera delle linee rette). Ora le mani si trovano molto più a ovest delle loro posizioni di partenza rispetto a quanto la punta della coda si trovi a est della sua posizione di partenza.

CONTRARRE LA CODA
Quando la coda si ricontrae, le mani si spostano di nuovo verso est per equilibrare la quantità di moto. Il ciclo delle azioni ha spostato l'intero nuotatore di una breve distanza verso ovest grazie alla distanza «extra» percorsa dalle mani.



Su una superficie a sella, che ha curvatura negativa, le stesse azioni sposterebbero il nuotatore verso est. Si vedano le animazioni di entrambi gli esempi alla pagina web http://physics.technion.ac.il/~avron.

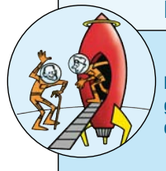
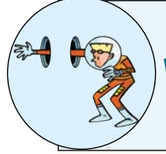
Giro girotondo

In prossimità della Terra lo spazio-tempo è così vicino all'essere piatto che non è possibile «nuotare» per spostarsi. Ma si può modificare il proprio orientamento senza bisogno di una forza esterna (proprio come un gatto che ruota mentre cade per atterrare sulle zampe). Ecco un modo per sperimentarlo.

1. Inginocchiatevi o sedetevi su una sedia girevole, preferibilmente che non si inclini. Reggete un peso con il braccio esteso su un lato (il peso aumenterà l'effetto).
2. Mantenendo il braccio teso, portate il peso sul lato opposto. Per conservare il momento angolare la sedia (e voi con lei) ruoterà nella direzione opposta.
3. Ora riportate indietro il peso facendolo passare il più vicino possibile all'asse della sedia.
4. La sedia girerà parzialmente nella direzione opposta a prima, ma alla fine dovrete ritrovarvi ruotati rispetto alla posizione iniziale. Ripetendo questi gesti potrete compiere una rotazione completa, se voi e la sedia siete ben bilanciati.

Altre stranezze oltre Newton

La relatività generale ha previsto da tempo vari effetti che non hanno un analogo nella gravitazione newtoniana, oltre ai fenomeni del nuoto e dell'aliante, scoperti da poco.

	EFFETTO	ESEMPIO	SPIEGAZIONE	TEORIA	STATO ATTUALE
	**Dilatazione gravitazionale dei tempi**	Una persona viaggia vicino a un buco nero; torna indietro più giovane del gemello rimasto a casa.	Il tempo scorre più lentamente in un campo gravitazionale forte.	Dedotta da Albert Einstein durante lo sviluppo della relatività generale.	Usata in ambito tecnologico: il Global Positioning System (GPS) deve tenere conto della dilatazione gravitazionale dei tempi nel cronometrare i suoi segnali per calcolare con precisione le posizioni.
	Onde gravitazionali	Onde di gravità che si propagano da un sistema stellare binario alla velocità della luce.	Le onde gravitazionali sono oscillazioni della geometria dello spazio-tempo, come se lo spazio-tempo stesso subisse compressioni e dilatazioni.	Le equazioni della relatività generale chiaramente permettono le onde, che però sono difficili da analizzare con esattezza.	Osservate indirettamente alla fine degli anni settanta: il periodo orbitale di una pulsar e di una stella di neutroni che formano un sistema binario diminuiva col passare del tempo come si era previsto che accada a causa dell'emissione di onde gravitazionali. LIGO, VIRGO e altri esperimenti puntano a osservazioni dirette di onde gravitazionali.
	Effetto Lense-Thirring	Un satellite vicino alla Terra sente una forza che lo trascina nella direzione della rotazione terrestre.	Come una palla che ruota nella melassa, una massa in rotazione trascina leggermente con sé lo spazio-tempo stesso.	Previsto da Joseph Lense e Hans Thirring nel 1918.	Nel febbraio 2009 è stato annunciato che le rilevazioni del satellite Gravity Probe B concordano con le previsioni entro un errore sperimentale del 15 per cento.
	**Wormhole**	Un'ipotetica scorciatoia che collega due diverse regioni dell'universo.	Ipotetiche forme straordinarie di energia produrrebbero uno spazio-tempo curvato negativamente, che è necessario per formare la struttura di un wormhole.	Presi in considerazione già nel 1916, nel 1988 si è mostrato che le equazioni della relatività generale consentono wormhole attraversabili.	Ancora molto congetturali; la maggior parte dei fisici ritiene che non ne verranno mai scoperti.

«Non è possibile sollevarsi tirando le linguette degli stivali, ma ci si può sollevare scalciando con i talloni».
Jack Wisdom, MIT

altrimenti vuoto. Non avrebbe stelle o galassie che gli facciano da riferimento per valutare il proprio moto. Il fisico e filosofo Ernst Mach, un relazionalista, argomentò nel 1893 che in questa situazione il moto sarebbe privo di significato. Eppure anche uno spazio completamente vuoto può essere curvo, nel qual caso Mister Everard vi potrebbe nuotare.

Sembra quindi che lo spazio-tempo si comporti come un fluido virtuale rispetto al quale può essere definito il moto di un corpo isolato. Persino lo spazio completamente vuoto ha una sua specifica struttura geometrica: altro punto a favore del sostanzialismo. Allo stesso tempo, però, è la materia (o qualsiasi altra forma di energia) a dare allo spazio-tempo la struttura geometrica che osserviamo, e quindi lo spazio-tempo non è indipendente dal suo contenuto: punto a favore del relazionalismo. Il dibattito, che riemerge nei tentativi di sviluppare una teoria unificata della fisica, rimane irrisolto.

Sulle ali del tempo

Esausto per aver nuotato fino all'astronave, Mister Everard stava riposando all'interno della cabina, lasciando che il pilota automatico calcolasse la rotta del ritorno. Improvvisamente suonò l'allarme e cominciarono a lampeggiare le luci rosse che indicavano che l'astronave stava precipitando su un grande pianeta. Mister Everard fu felice per questa opportunità di fare nuove scoperte interessanti, ma atterrare su quel pianeta sarebbe stata un'impresa. L'astronave aveva decisamente poco carburante per una discesa controllata, e il pianeta era privo di atmosfera, il che rendeva inutile un paracadute.

Fortunatamente ricordava un articolo del 2007 scritto dal mio collega Ricardo A. Mosna, fisico matematico dell'Universidade Estadual de Campinas, in Brasile, e da me. Ispirandoci all'esempio di Wisdom, abbiamo scoperto un altro modo di sfruttare la relatività generale per controllare il moto. La nostra analisi indica che un oggetto può rallentare la sua discesa, per esempio verso un pianeta, distendendosi e contraendosi ripetutamente in modo asimmetrico, nel senso che il moto di estensione è più veloce di quello di contrazione. Un'astronave con un apparecchio che si muove in questo modo può funzionare come un aliante anche in assenza di aria.

In questo caso l'effetto ha a che fare con le caratteristiche temporali del moto anziché con quelle spaziali, il che mette in luce uno degli aspetti più profondi delle teorie di Einstein: il collegamento tra spazio e tempo. Nella meccanica newtoniana i fisici possono specificare l'ubicazione degli eventi usando tre coordinate per la posizione nello spazio e una per il tempo, ma i concetti di spazio e tempo sono ancora distinti. Nella relatività speciale sono inestricabilmente interconnessi. Due osservatori che si muovono a velocità diverse possono non essere d'accordo circa le loro misurazioni della distanza o dell'intervallo di tempo tra due eventi, ma concordano su una certa combinazione di spazio e tempo. Quindi gli osservatori vedono diversamente lo spazio e il tempo considerati separatamente, ma vedono lo stesso spazio-tempo.

Nella relatività generale la struttura dello spazio-tempo diventa distorta (cioè curva), producendo ciò che percepiamo come la forza di gravità. Mentre la gravità newtoniana coinvolge solo lo spazio, la gravità relativistica coinvolge anche il tempo. Questa distorsione dello spazio e del tempo porta a effetti come quello chiamato «trascinamento dei sistemi di riferimento» (*frame dragging*): un corpo in rotazione (come la Terra) esercita una lieve forza nella direzione della sua rotazione su altri oggetti vicini (come i satelliti in orbita). Semplificando, la Terra che ruota trascina lo spazio-tempo stesso, facendolo ruotare leggermente. Più in generale, la velocità del moto di una massa influenza il campo gravitazionale che essa genera. Il trascinamento dei sistemi di riferimento e l'«aliante» sono esempi di questo fenomeno.

L'effetto nuoto deriva dalla geometria non euclidea. L'aliante relativistico è conseguenza dell'indissolubilità di spazio e tempo. È possibile che altri fenomeni simili non siano ancora stati capiti all'interno delle imperscrutabili equazioni della relatività generale. Di sicuro Mister Everard e altri discepoli hanno in serbo ulteriori avventure. ■

➥ Letture

Space, Time, and Gravity: The Theory of the Big Bang and Black Holes. Wald R.M., University of Chicago Press, 1992.

Swimming in Spacetime: Motion in Space by Cyclic Changes in Body Shape. Wisdom J., in «Science», Vol. 299, pp. 1865-1869, 21 marzo 2003.

Swimming versus Swinging Effects in Spacetime. Guéron E., Maia C.A.S. e Matsas G.E.A., in «Physical Review D», Vol. 73, n. 2, 25 gennaio 2006.

Relativistic Glider. Guéron E. e Mosna R.A., in «Physical Review D», Vol. 75, n. 8, 16 aprile 2007.

Sulle rotte dell'avorio

Il numero di elefanti uccisi illegalmente in Africa per ricavare il prezioso materiale ha superato i massimi storici degli anni ottanta. Nuove tecniche forensi basate sull'analisi del DNA possono contribuire a fermare questo sanguinoso traffico

di Samuel K. Wasser, Bill Clark e Cathy Laurie

ZONA MORTA. Questo elefante è stato ucciso lo scorso ottobre nel Parc National Zakouma, in Ciad, quando i bracconieri hanno attaccato con le armi automatiche un branco al pascolo. È una delle 38.000 vittime che il commercio illegale di avorio produce ogni anno.

Jeff Hutchens, reportage Getty Images

Nel 1983, esplorando la piccola foresta di Malundwe, ai confini della Selous Game Reserve, in Tanzania, uno di noi (Wasser), trovò due crani di elefante che giacevano uno accanto all'altro. Il primo, molto grande, era di una femmina. L'altro era piccino: i suoi molari erano un quarto di quelli della femmina e non erano stati usati a sufficienza da mostrare segni di usura. I bracconieri avevano sparato prima al giovane elefante in modo da attirare la madre abbastanza vicino da abbatterla e prelevare le sue enormi zanne. Questa tecnica di sfruttamento dei legami familiari del sofisticato sistema sociale degli elefanti è stata usata migliaia di volte in Africa.

La riserva di Selous è l'area protetta più grande di tutta l'Africa, ma durante il sanguinoso decennio tra il 1979 e il 1989 fu pesantemente attaccata dai bracconieri. Almeno 700.000 elefanti furono uccisi in quegli anni, di cui 70.000 solo nel Selous. Poi, nel 1989, il nuovo responsabile per la fauna selvatica della Tanzania lanciò un'imponente iniziativa antibracconaggio chiamata Operazione Uhai. L'azione congiunta di guardie forestali, agenti di polizia ed esercito pose rapidamente fine a gran parte della caccia di frodo nel paese.

La Tanzania si unì poi ad altri sei paesi per chiedere all'ONU l'inserimento dell'elefante africano tra le specie dell'Allegato I della CITES, la Convenzione sul commercio internazionale di specie di fauna e flora selvatica a rischio di estinzione. Ciò permise di bloccare tutti gli scambi internazionali di elefanti e dei relativi prodotti. Inoltre le campagne di sensibilizzazione del problema crearono una tale avversione per l'avorio che la domanda mondiale crollò, e la caccia di frodo si fermò quasi completamente. Le nazioni occidentali contribuirono sborsando forti somme per gli aiuti alle operazioni antibracconaggio in tutta l'Africa. In complesso, si trattò probabilmente dell'azione legislativa internazionale di tutela della fauna selvatica più efficace della storia, e la pressione dell'opinione pubblica fu fondamentale per il suo successo.

Ma durò poco. Fin dall'inizio, vari paesi africani erano contrari a un divieto su scala continentale, e continuarono a insistere perché fosse abolito. Gli aiuti occidentali si esaurirono, lasciando le nazioni africane povere con gli equipaggiamenti contro i bracconieri ma senza i fondi per la loro manutenzione. Inoltre, l'avorio diventò un importante *status symbol* tra i nuovi borghesi dei paesi industrializzati dell'Estremo Oriente, come Cina e Giappone. La domanda proveniente da questi e da altri paesi ricchi, tra cui gli Stati Uniti, ha fatto aumentare il prezzo all'ingrosso dell'avorio di miglior qualità dai 200 dollari al chilogrammo del 2004 agli 850 del 2007. Nel 2009 il prezzo è raddoppiato ancora. Nel marzo 2008 le autorità cinesi hanno sequestrato un carico di avorio di 790 chilogrammi, stimando che al dettaglio avrebbe potuto rendere 6500 dollari al chilogrammo.

Sotto le pressioni dei paesi africani che volevano vendere il proprio avorio e di quelli orientali che volevano importarlo, alla fine la CITES ha deciso di autorizzare due vendite *una tantum* di avorio, che però sarebbe dovuto provenire da animali morti in modo naturale o abbattuti legalmente. I paesi che volevano partecipare alla compravendita dovevano dimostrare di essersi impegnati per limitare il commercio illegale di avorio al proprio interno. È stato anche avviato un programma di monitoraggio per capire se le vendite legali avrebbero causato una ripresa del bracconaggio (i dati raccolti, però, non furono mai ritenuti sufficienti per stabilirlo).

Nel 2006 la situazione era peggiore di prima dell'introduzione del divieto. In quell'anno sono stati sequestrati tra i 25.000 e i 29.000 chilogrammi di avorio provenienti dall'Africa. Attratte dalla crescita della domanda, le grandi organizzazioni criminali si sono inserite nel settore, anche perché i rischi sono bassi e la liberalizzazione del commercio globale ha reso più facile il contrabbando di grossi volumi di merce. Basandoci sui sequestri del 2006, abbiamo stimato che ogni anno venga abbattuto oltre l'8 per cento della popolazione africana di elefanti (*si veda il box a p. 86*). Questo tasso di mortalità supera il ritmo annuale di riproduzione degli elefanti, che è del 6 per cento in condizioni ottimali, ed è persino superiore a quel 7,4 per cento di mortalità dovuta al bracconaggio che nel 1989 portò all'introduzione del divieto.

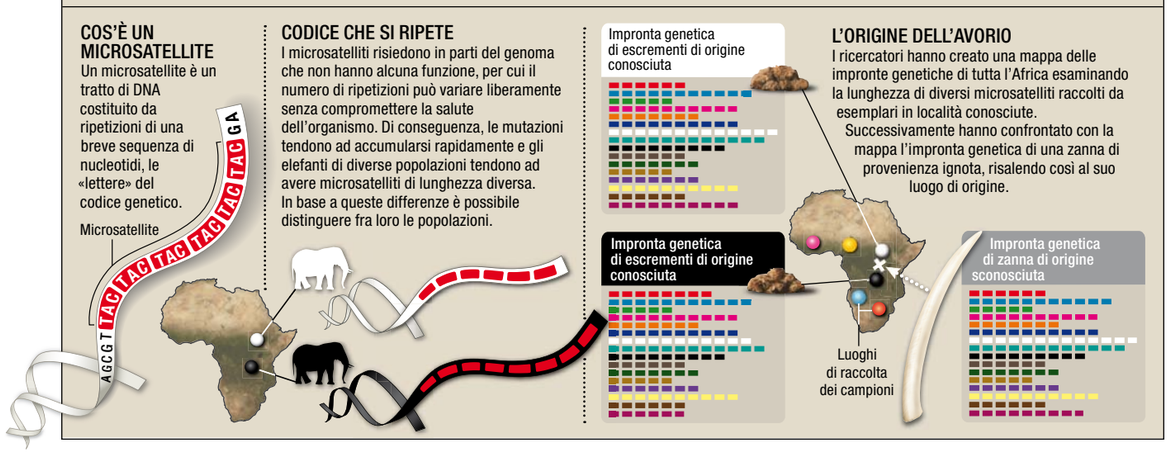
Per fermare questo massacro è necessario che le forze dell'ordine concentrino le loro operazio-

IN SINTESI

- Dopo il divieto internazionale sull'avorio che nel 1989 aveva quasi eliminato il bracconaggio di elefanti, la domanda ha ricominciato a crescere. Oggi le popolazioni di elefanti vengono decimate più che in passato.
- Usando il DNA presente negli escrementi è stata creata una mappa di tutte le popolazioni di elefanti presenti in Africa.
- La mappa ha reso possibile individuare l'origine dell'avorio sequestrato. Si è così scoperto che i bracconieri prendono di mira gruppi specifici di animali e li sfruttano intensivamente.

L'impronta genetica

Dall'avorio gli inquirenti possono risalire a una determinata popolazione di elefanti applicando l'impronta genetica, o *fingerprinting*, una tecnica che analizza particolari sequenze di DNA note come microsatelliti.



ni nei luoghi in cui gli elefanti vengono cacciati. Fino a poco tempo fa, tuttavia, gli investigatori non riuscivano quasi mai a stabilire la provenienza dell'avorio sequestrato. Le zanne potevano provenire da un paese, essere lavorate in un altro e infine imbarcate da un altro paese ancora.

Sapere dove vengono uccisi gli elefanti serve anche a fare pressione sui paesi le cui misure antibracconaggio sono insufficienti. Inoltre lo schema geografico può aiutare a capire come operano i bracconieri. Se per esempio gran parte dell'avorio di un carico proviene da un unico luogo si può dedurre che i bracconieri stanno prendendo di mira una specifica popolazione di elefanti. In questo caso la polizia dovrebbe cercare un gruppo chiuso e organizzato di bracconieri. Se invece l'avorio sequestrato proviene da luoghi diversi e molto distanti, è probabile che i compratori acquistino la merce da piccoli venditori non organizzati.

Per risalire all'origine dei carichi sequestrati e determinare in quali parti dell'Africa si concentrano i bracconieri, abbiamo sviluppato alcuni metodi di analisi forense del DNA. I nostri metodi molecolari sono simili a quelli usati per confrontare le prove trovate sulla scena di un delitto, come sangue e altri tessuti umani, con quelli dei sospettati. Nel nostro caso, però, il materiale recuperato sulla scena del crimine è l'avorio, e il confronto viene fatto con le popolazioni di elefanti in Africa.

In questo articolo presentiamo i primi risultati relativi a tre diversi sequestri di avorio, tutti avvenuti nel 2006, nell'arco di due mesi. Complessivamente, i tre sequestri ammontavano a quasi

La crescita della domanda mondiale di avorio ha attirato le grandi organizzazioni criminali

11 tonnellate di avorio di contrabbando, ossia oltre un terzo della quantità record di 25.000-29.000 chilogrammi sequestrata quell'anno. Poche popolazioni sono in grado di sostenere un simile livello di bracconaggio. Se la provenienza di quell'avorio fosse stata un'area relativamente circoscritta, sarebbe stata la prova che dietro al massacro c'era una delle maggiori organizzazioni di contrabbando dell'avorio del mondo.

I sequestri

Lunedì 3 luglio 2006; porto di Kaohsiung, Taiwan. Un controllo automatizzato di routine avverte la dogana di Kaohsiung della presenza di due container sospetti. Entrambi sono partiti dalla Tanzania e sono diretti verso le Filippine, dopo essere già passati per Kaohsiung nel corso del medesimo viaggio. I container sembrano andare avanti e indietro tra i porti dell'Estremo Oriente senza un'apparente destinazione finale. Gli agenti della dogana controllano i documenti cartacei, secondo cui i container trasportano fibra di sisal. Ma esportare sisal dall'Africa alle Filippine è come spedire palle di neve dalla Svezia alla Siberia: le Filippine coltivano tonnellate di quella pianta fibrosa. Gli ispettori decidono quindi di aprire uno dei container:

GLI AUTORI

SAMUEL WASSER è professore di biologia all'Università di Washington, dove dirige anche il Center for Conservation Biology. Ha ideato e coordinato il progetto di analisi genetica forense dell'avorio. **BILL CLARK** è direttore del Working Group on Wildlife Crime dell'Interpol; lavora inoltre nell'Agenzia israeliana per la protezione della natura e dei parchi. È pioniere nell'introduzione dei metodi forensi nell'ambito dell'ecocrimine. **CATHY LAURIE**, che si occupa di genetica statistica all'Università di Washington, ha condotto le analisi dei carichi sequestrati a Taiwan e a Hong Kong. Importanti contributi sono giunti anche da altri due studiosi: Celia Mailand, ricercatrice al Center for Conservation Biology, che ha condotto tutte le analisi di laboratorio, e Matthew Stephens, professore di genetica umana e statistica all'Università di Chicago, che ha sviluppato tutti i metodi statistici e il software usati nel progetto.

MERCATO BIANCO. I mercati come quello di Kinshasa, nella Repubblica Democratica del Congo (*sopra*), sono aumentati di numero per sostenere il crescente commercio di avorio. Il grosso della domanda, tuttavia, arriva dai paesi industrializzati dell'Estremo Oriente, dove vige l'uso di timbrare i documenti con sigilli personali detti *hanko* (*sotto*).

nascoste dietro 60 balle di sisal ci sono 744 zanne di elefante. Altre 350 sono nel secondo container, per un totale di 5,2 tonnellate di avorio africano illegale, per un valore stimato di 4,6 milioni di dollari all'ingrosso e oltre 21 milioni di dollari al dettaglio.

Sabato 8 luglio 2006; Sai Ying Pun, Hong Kong. A cinque giorni di distanza dai sequestri di Taiwan, un abitante del posto denuncia il terribile odore di bruciato proveniente dall'appartamento di un vicino. Polizia e vigili del fuoco arrivano subito. Poiché dall'appartamento nessuno risponde, sfondano la porta. E scoprono sette persone intente a tagliare e impacchettare 2,6 tonnellate di avorio. Le autorità sequestrano 390 zanne più 121 pezzi già tagliati. Alcuni elementi indicano una provenienza dall'Africa orientale.

Michael Freeman/Aurora Photos (*sigilli*); Patrick Robert/Corbis (*mercato*)

Jen Christiansen (*illustrazione*); NASA/The Visible Earth (*mappa*)

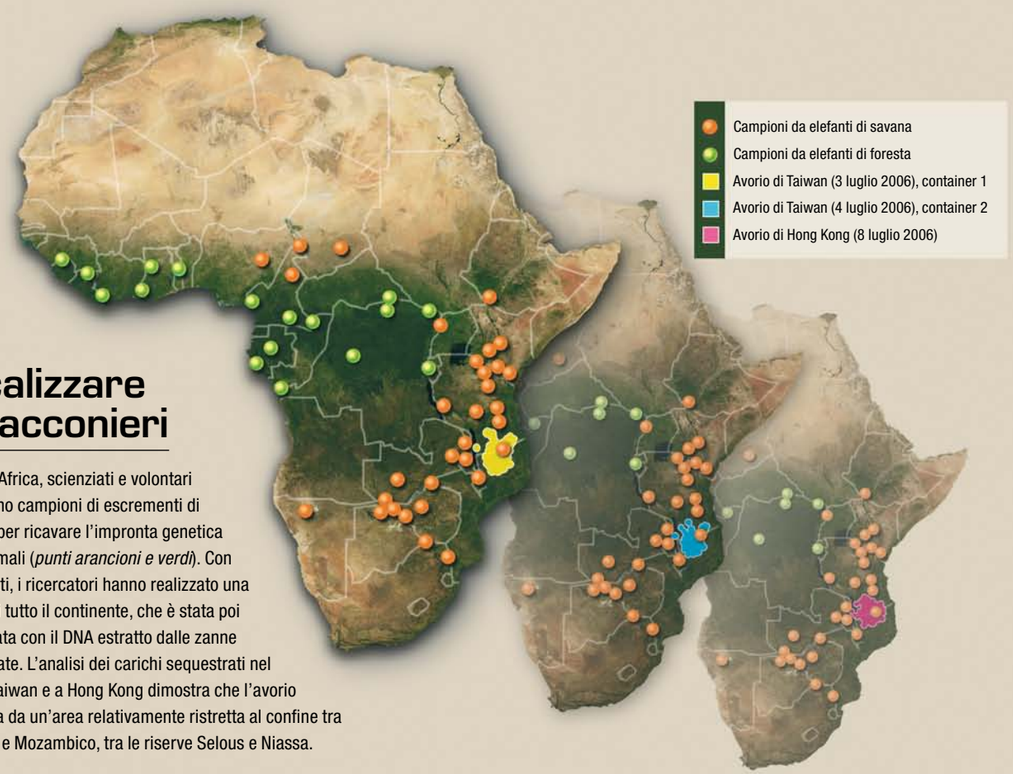
Lunedì 28 agosto 2006; porto di Osaka, Giappone. Gli agenti della dogana trovano 608 pezzi di avorio grezzo che, ricomposti, danno un totale di 260 zanne, pari a 2,8 tonnellate. È il più grande sequestro mai effettuato in Giappone. Molte delle zanne recano numeri in swahili (*si veda l'illustrazione a p. 89*), indicando una spedizione dall'Africa orientale. Nello stesso carico ci sono anche 17.928 cilindri di avorio intagliato destinati al mercato dei timbri *hanko*, che si usano in Giappone e in Cina per apporre il proprio sigillo su assegni, documenti legali e lettere. (Benché oggi questo sia uno degli usi più comuni dell'avorio, è una «moda» piuttosto recente; storicamente gli hanko erano prodotti in materiali come la giada.) Le autorità giapponesi non fanno però alcun cenno al sequestro durante l'incontro annuale del comitato permanente della CITES, in cui si sarebbe dovuto decidere se autorizzare il Giappone a partecipare a una vendita *una tantum* di avorio dell'Africa meridionale. Il 7 ottobre 2006, però, il quotidiano «Asahi Shimbun» riferisce del sequestro e le autorità giapponesi sono costrette ad ammettere tutto.

Quando abbiamo saputo dei sequestri abbiamo chiesto campioni dell'avorio recuperato per analizzarne il DNA nei laboratori del Center for Conservation Biology dell'Università di Washington. I risultati sarebbero stati condivisi tra i paesi donatori, l'Interpol e la Lusaka Agreement Task Force, un'agenzia di cooperazione di paesi africani che combattere i crimini contro le specie selvatiche. Hong Kong e Taiwan hanno accettato di fornire i campioni, mentre il Giappone, nonostante le numerose richieste, non ha ancora inviato nulla.

La mappa del DNA

Per estrarre il DNA dall'avorio abbiamo usato una tecnica di polverizzazione presa in prestito dall'odontologia forense. Il procedimento prevede l'inserimento di un pezzo di avorio grande più o meno come una nocciolina all'interno di tubo di policarbonato; insieme all'avorio si aggiunge un piccolo magnete e si sigilla il tubo con due tappi di acciaio inossidabile. Poi, si immerge il campione in azoto liquido a –240 gradi Celsius, all'interno di un dispositivo detto mulino criogenico (*freezer mill*). Qui, un campo magnetico che oscilla rapidamente sbatte l'avorio contro i due tappi, riducendolo a una polvere fine. Durante tutto il procedimento la bassa temperatura mantiene il DNA integro.

Successivamente il materiale genetico è isolato dalla polvere: da esso si ricava un'impronta genetica grazie alle variazioni di alcuni segmenti di DNA detti microsatelliti (*si veda il box a fronte*). I microsatelliti sono composti da un numero di



Localizzare i bracconieri

In tutta l'Africa, scienziati e volontari raccolgono campioni di escrementi di elefante per ricavare l'impronta genetica degli animali (*punti arancioni e verdi*). Con questi dati, i ricercatori hanno realizzato una mappa di tutto il continente, che è stata poi confrontata con il DNA estratto dalle zanne sequestrate. L'analisi dei carichi sequestrati nel 2006 a Taiwan e a Hong Kong dimostra che l'avorio proveniva da un'area relativamente ristretta al confine tra Tanzania e Mozambico, tra le riserve Selous e Niassa.

NASA/The Visible Earth (*mappa*)

QUANTE SONO LE VITTIME?

Tra il 1979 e il 1989 l'esplosione del bracconaggio ridusse gli elefanti africani da 1,3 milioni a meno di 600.000, una perdita del 7,4 per cento all'anno. Dal 2006, il traffico illegale di avorio è tornato agli stessi livelli: tra agosto 2005 e agosto 2006, infatti, sono state sequestrate più di 25 tonnellate di avorio. Poiché in genere una percentuale di intercettazione delle merci di contrabbando del 10 per cento è ritenuta un successo, si stima che in quel periodo siano state contrabbandate più di 250 tonnellate di avorio. A una media di 6,6 chilogrammi di avorio per elefante, significa che ogni anno vengono uccisi 38.000 elefanti.

nucleotidi variabile tra due e quattro, che vengono ripetuti da 10 a 100 volte. Al contrario dei geni funzionali, il DNA dei microsatelliti non codifica per alcuna proteina, quindi il numero di ripetizioni può variare liberamente senza compromettere la salute dell'organismo né la sua capacità di riprodursi. Perciò le variazioni nel numero delle ripetizioni sono frequenti e tendono a fissarsi nel DNA. Con il passare del tempo, i microsatelliti di una popolazione arrivano a differire da quelli delle popolazioni di altre aree geografiche.

Ottenuta l'impronta genetica di una zanna, è possibile confrontarla con una mappa di impronte genetiche prelevate da elefanti di tutta l'Africa. Dieci anni fa decidemmo infatti di creare una mappa delle variazioni del DNA microsatellitare in tutto il continente: un progetto che si rivelò molto più impegnativo del previsto.

L'Africa è un continente sterminato, e la precisione delle attribuzioni del DNA estratto dall'avorio è direttamente legata alla completezza della nostra mappa. Per facilitare la raccolta del DNA di riferimento, abbiamo estratto materiale genetico dalle varie popolazioni nel modo meno invasivo, prelevandolo dalle feci (ogni grammo di feci di elefante contiene milioni di cellule della mucosa intestinale). La raccolta di un numero sufficiente di campioni ha richiesto l'aiuto di molti scienziati e personale specializzato; ma per quanto numerosi fossero i campioni di feci raccolti, non sarebbero mai bastati per mappare l'intero continente.

Per coprire le zone dove i dati erano insufficienti ci siamo serviti di una tecnica statistica da noi sviluppata, chiamata SCAT (*Smoothed Continuous Assignment Technique*, tecnica di assegnazione continua regolare). Un software basato su questo metodo estrapola i dati raccolti in luoghi diversi, che costituiscono una distribuzione geografica discreta, ricavandone una distribuzione continua delle impronte genetiche (la lunghezza dei vari microsatelliti in ognuno dei 16 loci). Il metodo si basa sul fatto che due popolazioni vicine tendono a essere geneticamente più simili rispetto a due popolazioni lontane. Abbiamo controllato l'efficacia della procedura SCAT usandola per determinare l'origine di campioni di provenienza nota.

Anatomia di un carico

Il primo caso a cui abbiamo applicato il nostro metodo di attribuzione del DNA evidenzia molto bene le dimensioni e la complessità dell'attuale mercato dell'avorio. Nel febbraio 2002 le autorità del Malawi, in cooperazione con quelle dello Zambia e con la Lusaka Agreement Task Force, hanno perquisito una fabbrica per la lavorazione dell'avorio in cui, ufficialmente, si usava materiale acqui-

Kwai Chow Wong/Getty Images

Non solo avorio

Il traffico illegale di molte specie esotiche e dei prodotti da esse derivati sta crescendo in tutto il mondo, molto più di quanto le forze di polizia riescano a fare per controllarlo. Studi attendibili indicano che il giro d'affari intorno alle specie selvatiche sia dell'ordine delle decine di miliardi di dollari all'anno. La liberalizzazione del commercio globale ha contribuito a espandere il mercato dei prodotti illegali e lo stesso ha fatto la tecnologia: secondo recenti ricerche, infatti, una parte importante dell'avorio in vendita su Internet è di origine sospetta. Anche il notevole volume del commercio legale di specie rare (ogni anno la CITES autorizza la vendita di più di 100 milioni di individui appartenenti a specie rare) fornisce un canale ideale per i traffici illeciti. Come per l'avorio, è ormai chiaro che dietro a questi scambi ci sono potenti organizzazioni criminali. Solo negli ultimi anni, le autorità hanno effettuato un numero preoccupante di sequestri, confiscando 55.000 pelli di rettile in India, 19.000 pinne di squalo volpe occhione in Ecuador, 23 tonnellate di pangolini in Asia, 3000 scialli di *shahtoosh* in India, ottenuti da almeno 12.000 antilopi tibetane, e, sempre in India, 2000 tartarughe stellate indiane (*sopra*).

stato legalmente dal governo del Malawi. Nello stabilimento, però, fu trovato molto più avorio di quanto elencato sulla documentazione ufficiale, e solo pochissimi pezzi recavano il timbro governativo. Tra il materiale sequestrato c'erano anche molti pezzi di scarto con fori cilindrici, quasi sicuramente utilizzati per ricavare timbri hanko destinati al mercato giapponese.

Su alcuni documenti trovati durante la perquisizione erano descritte altre 19 spedizioni effettuate nei nove anni precedenti. In tutte figuravano lo stesso spedizioniere, gli stessi codici di identificazione (steatite o legname) e la stessa origine, e quasi tutte avevano la stessa destinazione. Stando a uno dei documenti, c'era un carico di 6,5 tonnellate di avorio (registrato come steatite) che si trovava in un luogo ignoto in attesa della consegna.

A giugno dello stesso anno le autorità hanno scoperto che l'avorio mancante era stato trasportato in camion fino a Beira, in Mozambico, e successivamente caricato su una nave diretta a Durban, in Sudafrica, dove era stato trasferito su un'altra nave diretta a Singapore. Le autorità locali, avvisate del carico appena quattro ore prima che arrivasse in porto, sono riuscite a confiscare il container. Al suo interno c'erano 532 zanne, con un peso medio insolitamente alto di 12 chilogrammi per zanna, e 42.000 timbri hanko, i cui fori corrispondevano a quelli delle zanne sequestrate in Malawi. Molte zanne erano marchiate con la scritta «Yokohama», la celebre città portuale nei pressi di Tokyo.

Nei documenti recuperati in Malawi non era indicato il peso degli altri 18 carichi illegali di avorio. Tuttavia, presumendo che ognuno di quei carichi fosse simile per dimensioni a quello sequestrato a Singapore, è probabile che il loro peso totale si avvicinasse alle 110 tonnellate, equivalenti a circa 17.000 elefanti.

Gli enormi quantitativi risultanti da questi sequestri indicavano una crescita sostanziale del commercio illegale dell'avorio e rivelavano che gran parte di esso era gestita da grosse organizzazioni criminali. Spostare quantità così ingenti di avorio richiede infatti un'ampia conoscenza del mercato, della finanza internazionale e di altre discipline commerciali. Per poter ricevere e lavorare simili quantità di avorio, è indispensabile essere dotati di strutture adeguate in Oriente, fabbriche in grado di produrre decine di migliaia di hanko all'anno e una rete di distribuzione e vendita di dimensioni adeguate. I milioni di dollari generati dalle vendite devono poi essere riciclati attraverso canali legali e trasferiti in altre parti del mondo per pagare nuovi carichi. La corruzione ad alti livelli in questi casi è la norma. Ci sono anche casi di bracconieri che scambiano i frutti della loro attività con armi e munizioni, necessari per mantenere al potere i funzionari corrotti.

Se non sarà fermato il contrabbando al più presto, in Africa rimarranno pochissimi elefanti allo stato selvatico

Infine, se è vero che i profitti sono alti, i rischi legati a questi traffici sono invece molto bassi. Sono pochi i contrabbandieri di specie esotiche che vengono perseguiti, perché questo tipo di reato è in genere considerato dalla polizia di bassa priorità rispetto a crimini come il terrorismo, il traffico di droga, l'omicidio e i reati finanziari. Quasi nessuna delle persone coinvolte nel sequestro di Singapore è stata processata, nemmeno gli ufficiali della dogana che hanno firmato i documenti in cui si diceva che il container conteneva steatite invece che avorio. In molti altri paesi, chi viene catturato è soggetto a una semplice sanzione economica, spesso persino più bassa dell'imposta sulla vendita.

Rapidi e aggressivi

Gli inquirenti avevano il forte sospetto che l'avorio confiscato a Singapore fosse stato lavorato nello stabilimento in Malawi. È stata però necessaria un'analisi del DNA per dimostrare che i campioni provenivano tutti dalla stessa fonte. La nostra ricerca ha scoperto che le zanne e gli hanko trovati a Singapore, nonché gli scarti di avorio dello stabilimento in Malawi, provenivano tutti da una popolazione di elefanti di savana residen-

Troppi elefanti?

Dopo l'introduzione del divieto di esportazione dell'avorio si è diffuso il falso mito che adesso in Africa ci sarebbero troppi elefanti. I reportage giornalistici si sono concentrati su un piccolo gruppo di paesi dell'Africa meridionale che hanno chiesto di abbattere legalmente alcuni elefanti perché la loro densità è diventata eccessiva in alcune aree protette, causando conflitti con le popolazioni umane locali.

Il problema, in realtà, è molto più complesso. Nell'Africa meridionale la maggior parte delle aree protette in cui la densità degli elefanti è elevata sono recintate, per cui le possibilità di movimento degli animali sono fortemente limitate. Nei paesi del resto del continente, invece (e anche in alcuni dell'Africa meridionale), questi animali sono decimati dal bracconaggio. Avrebbe senso uccidere altri elefanti? Il biologo sudafricano Rudi van Aarde propone una semplice soluzione: abbattere le recinzioni e creare megaparchi che trascendano i confini tra i paesi. Molti degli elefanti che oggi vivono in zone recintate si trovano vicino ad aree con basse densità di popolazione, sia umana sia animale, che offrirebbero abbondante libertà di movimento. I megaparchi alleggerirebbero le zone in cui l'attività degli animali è troppo concentrata, riducendo di conseguenza l'impatto sul resto della catena alimentare.

I conflitti tra uomo ed elefanti si verificano soprattutto quando gli animali escono dalle aree protette ed entrano nelle proprietà terriere confinanti. La causa principale di queste invasioni è senz'altro la perdita di habitat, ma non bisogna sottovalutare gli effetti del bracconaggio sulla struttura sociale degli elefanti. Le femmine più anziane sono quasi sempre le prime a essere uccise, perché, insieme ai maschi adulti, sono quelle che hanno le zanne più grosse. Inoltre, i gruppi sociali costituiti da femmine sono molto più facili da trovare rispetto ai maschi solitari. Uno studio del 1989 determinò che l'80 per cento dei crani di elefanti abbattuti dai bracconieri apparteneva a femmine con un'età media di 32 anni.

Queste femmine anziane, o matriarche, hanno un ruolo fondamentale nella società degli elefanti: dirigono gli spostamenti del gruppo, ne mantengono la competitività rispetto agli altri branchi e forniscono la coesione sociale che rende il gruppo unito e sano. Privati dei loro leader e con le «aree protette» non più sicure a causa dei bracconieri, gli elefanti fuggono. Non a caso, massicci esodi di elefanti sono stati documentati durante i massacri delle guerre civili in Mozambico, Angola e altre zone. Gli elefanti privi di leader escono dalle aree protette, incontrano i campi coltivati e la povera gente che li difende; scambiano quegli esseri umani per bracconieri e li attaccano per salvarsi la vita.

John Hrusa/Corbis

te nello Zambia. Il collegamento degli hanko e delle zanne di Singapore alla stessa popolazione spiegherebbe la misteriosa assenza di zanne medie e piccole in quel sequestro: probabilmente le zanne più piccole erano state usate per fabbricare gli hanko in Malawi. Questa strategia è stata adottata quasi sicuramente per aumentare il valore del carico diretto in Giappone, dato che i giapponesi preferiscono le zanne grandi. È evidente anche che i bracconieri hanno abbattuto animali di tutte le età: è necessario un gran numero di giovani elefanti per produrre 42.000 timbri di avorio.

Il sequestro è avvenuto nel 2002, lo stesso anno in cui lo Zambia ha chiesto alla CITES di poter vendere le proprie riserve di avorio in una delle vendite *una tantum* autorizzate dalla Convenzione. La CITES ha respinto la richiesta, anche per il sospetto che una parte dell'avorio recuperato a Singapore provenisse proprio dallo Zambia. I risultati della nostra ricerca hanno convalidato quella decisione.

L'analisi dell'avorio sequestrato a Singapore ha dimostrato per la prima volta che i bracconieri si concentrano su specifiche popolazioni e le sfruttino in maniera intensiva. L'azione su quegli elefanti, infatti, era stata rapida e aggressiva, presumibilmente per soddisfare un ordine effettuato dai compratori. Questa scoperta ha sfatato la teoria secondo cui i trafficanti raccoglierebbero l'avorio in varie località dell'Africa fino ad accumularne a sufficienza per completare i carichi. Grazie a queste tecniche, le forze di polizia d'ora in poi potranno concentrarsi sui punti più caldi e attuare strategie antibracconaggio più efficaci.

Gli affari vanno avanti

I nostri studi più recenti sui carichi sequestrati a Taiwan e a Hong Kong nel 2006 hanno dimostrato che l'attuale ondata di distruzione è identica a quella degli anni ottanta. Gli scambi avvenuti nel 2006 hanno inoltre richiesto un elevato livello di organizzazione e numerosi contatti nel mondo politico. La nostra analisi del DNA ha rivelato che la zona di provenienza delle zanne corrispondeva a un'area suddivisa tra la riserva del Selous, in Tanzania, e la riserva Niassa, nel nord del Mozambico (*si veda il box a p. 86*).

Sembra quindi che la Tanzania sia nuovamente al centro dell'attenzione dei bracconieri. D'altra parte proprio in questo paese si trovano il Parco nazionale del Serengeti; il torrente Gombe, dove Jane Goodall svolse le sue famose ricerche sugli scimpanzè; il Monte Kilimangiaro; i Monti dell'Arco orientale, che ospitano il numero più alto al mondo di specie autoctone per chilometro quadrato; e, naturalmente, la riserva del Selous. Quello stesso anno la Tanzania ha chiesto alla CITES di poter vendere le proprie riserve di avorio, ma ha poi ritirato la richiesta in seguito a pressioni internazionali.

CASO INSOLUTO. A poche settimane di distanza dai sequestri di Taiwan e Hong Kong, le autorità giapponesi hanno confiscato a Osaka 608 pezzi di avorio grezzo, per un totale di 2,8 tonnellate (*a sinistra*). Tuttavia non hanno ancora inviato ai ricercatori i campioni per le analisi del DNA, per cui è impossibile dire con certezza da dove fosse partito quell'avorio. Alcuni elementi, però, come le scritte in swahili presenti su molte delle zanne (*sotto*), fanno supporre che il carico fosse partito dalla Tanzania (lo swahili è parlato principalmente in Tanzania).

Japan Wildlife Conservation Society

Una domanda ancora senza risposta è se l'avorio sequestrato a Osaka provenisse anch'esso dalla Tanzania. Mentre il nostro laboratorio analizzava il materiale sequestrato a Taiwan e a Hong Kong, le autorità giapponesi concludevano il proprio lavoro su quello che sarebbe poi risultato il più grande tentativo di importazione illegale di avorio nella storia del Giappone. Nel 2007 un tribunale giapponese ha condannato un uomo per il tentato contrabbando del carico, ma la pena è stata sospesa e gli è stata inflitta una multa equivalente a meno dell'uno per cento del valore stimato dell'avorio. Le autorità giapponesi hanno poi incenerito l'avorio, rendendo impossibile un'analisi del DNA. Sono stati conservati circa 100 piccoli pezzi con un peso medio di 0,3 grammi, che però non ci sono ancora stati messi a disposizione, e che comunque potrebbero essere insufficienti per svolgere le analisi. Sempre nel 2007, il Giappone era stato autorizzato dalla CITES ad acquistare avorio in una vendita legale che si sarebbe tenuta nel 2008.

Queste vendite sono problematiche, indipendentemente da quanto vengano attentamente monitorate. L'esistenza dei mercati legali di avorio, soprattutto in Estremo Oriente, influenza la percezione generale e legittima la passione per questo materiale. Molto probabilmente i mercati legali assorbono una parte consistente dell'avorio di contrabbando, e permettono ai trafficanti di ripulire facilmente quello destinato agli altri mercati. Del resto, come sarebbe possibile immettere sul mercato al dettaglio centinaia di migliaia di pezzi di avorio intagliato se non attraverso i canali commerciali convenzionali?

I paesi industrializzati in cui viene commercializzato l'avorio di contrabbando non hanno saputo dare un sostegno credibile alle agenzie africane che proteggono gli elefanti, benché il denaro che arricchisce i bracconieri provenga dai loro cittadini. I paesi africani in via di sviluppo sono oggi estremamente vulnerabili al potere e al denaro di queste organizzazioni criminali, un potere alimentato dalle ricche economie industriali. L'analisi del DNA può contribuire a rendere più efficaci le azioni di controllo, ma è necessario fare di più se vogliamo fermare il massacro. Al momento in cui scriviamo questo articolo, le uccisioni continuano: il 9 marzo 2009 le autorità vietnamite hanno confiscato un carico di avorio di 6,2 tonnellate, presumibilmente proveniente dalla Tanzania. Si tratta del secondo più grande sequestro di avorio da quando è stato introdotto il divieto.

Nel 1989 l'opinione pubblica contribuì significativamente a fermare il commercio illegale dell'avorio e la stessa cosa sarebbe possibile oggi. Secondo le nostre stime, nel solo 2006 più di 38.000 elefanti africani sono stati uccisi per prelevarne le zanne. Tutto indica che il bracconaggio non accenna a diminuire: anzi, in alcuni paesi sembra persino intensificato. Se il commercio illegale dell'avorio non sarà fermato al più presto, in Africa non rimarranno che pochissimi elefanti allo stato brado: una perdita incalcolabile per l'intero continente, e un prezzo troppo alto da pagare per un bene la cui unica giustificazione è la vanità. ■

Letture

Elephant Reflections. Fotografie di Karl Ammann. Testi di Dale Peterson. University of California Press, 2009.

The Center for Conservation Biology. Università di Washington: **www.conservationbiology.net.**

Animal Investigators: How the World's First Wildlife Forensics Lab Is Solving Crimes and Saving Endangered Species. Laurel A. Neme, Scribner, 2009.

Combating the Illegal Trade in African Elephant Ivory with DNA Forensics. Wasser S.K. e altri, in «Conservation Biology», Vol. 22, pp. 1065-1071, 2008.

Scienze forensi e DNA

Già da anni molti paesi stanno istituendo banche dati del DNA a fini identificativi, ma in assenza di un impiego univoco e di un quadro giuridico armonizzato per la protezione dei dati personali, la raccolta e lo scambio di dati genetici potrebbe comportare gravi ricadute sui diritti individuali e sulla privacy genetica

di Lucia Bianchi e Pietro Liò

Dan McCoy - Rainbow/Science Faction/Corbis

IN SINTESI

- Il sequenziamento del genoma di un individuo sta per diventare un'operazione di routine, e la raccolta e la conservazione dei dati genetici relativi a vaste popolazioni potrà avere numerose applicazioni, dalla medicina personalizzata alla genetica forense.
- In quest'ottica, molti paesi hanno già istituito banche dati che contengono informazioni sul DNA di milioni di cittadini, ma la disponibilità dell'intera sequenza di singoli individui apre interrogativi etici e di privacy ai quali la legislazione internazionale dovrà dare risposta.

I database del DNA istituiti a livello europeo dimostrano come l'apporto strategico delle scienze forensi risulta sempre più determinante e fondamentale per scagionare un innocente o incastrare un criminale. A oggi in Italia non è stata ancora compiutamente attuata la Banca dati del DNA ai fini identificativi (il ministro dell'Interno Roberto Maroni ha annunciato che potrebbe essere attiva dal 2010) e pari ritardo registra l'accreditamento degli esperti e laboratori forensi che collaborano con la giustizia.

La realizzazione della banca dati genetica pone fondamentalmente due problemi: quello del prelievo coattivo di materiale genetico e un'attenta regolamentazione della raccolta, dell'archiviazione e dell'analisi del materiale raccolto. Tutto ciò presuppone una complessa struttura organizzativa, un'attività di pianificazione, investimenti finanziari, una regolamentazione organica dei limiti del prelievo e un rispetto dei concorrenti diritti di riservatezza e libertà individuali.

Il sequenziamento del genoma umano ha richiesto 13 anni e 2,7 miliardi di dollari. Sebbene oggi il costo per l'identificazione di ciascuna delle 3 miliardi di basi di DNA del genoma umano si sia ridotto di 100 volte, rimane sempre una spesa notevole. Di recente i National Institutes of Health degli Stati Uniti hanno finanziato progetti di sequenziamento che propongono costi inferiori ai 1000 dollari per genoma. Al contempo, al fine di studiare la variabilità genetica umana il consorzio internazionale HAPMAP ha cominciato il sequenziamento del genoma di 1000 individui appartenenti a vari gruppi etnici. (Interessante la composizione: yoruba a Ibadan, in Nigeria; giapponesi di Tokyo; cinesi di Pechino; residenti nello Utah discendenti del nord Europa; luhya e maasai del Kenya; toscani; indiani gujarati residenti a Houston; cinesi residenti a Denver; discendenti di messicani residenti a Los Angeles; discendenti di africani residenti nel sud-ovest degli Stati Uniti).

Gli esperti di tecnologia del sequenziamento genetico ritengono che entro vent'anni si aprirà la strada al sequenziamento di routine di genomi umani (o di animali). Coloro che si sottoporranno a test medici disponendo della sequenza del proprio genoma avranno accesso a cure e farmaci personalizzati. Ciò comporterà la sopravvivenza di molte persone che ogni anno perdono la vita a causa di reazioni avverse e imprevedibili legate all'uso di farmaci generici, che in genere funzionano bene per la maggior parte della popolazione ma sono inefficaci o dannosi per alcuni. Appare verosimile pensare a un futuro mercato dei farmaci diviso tra farmaci generici relativamente economici e costo-

La situazione europea

In molti paesi, primo tra tutti il Regno Unito, ci sono state forti pressioni della polizia per creare una banca nazionale di dati genetici a fini identificativi includendo i profili di DNA dell'intera popolazione. Dal 1995 nel Regno Unito si raccolgono i profili genetici per individuare i protagonisti di crimini e reati. Oggi nella banca dati genetica nazionale britannica sono registrati i profili del DNA di oltre quattro milioni di persone, più del 5,2 per cento della popolazione). Una mole enorme di informazioni genetiche, che dipende dal fatto che le forze dell'ordine possono obbligare qualsiasi persona in custodia a fornire campioni di DNA (che resteranno negli archivi di polizia). Di recente, per garantire la sicurezza nazionale e la prevenzione del crimine, Scotland Yard ha lanciato una nuova e controversa strategia di prevenzione: schedare e archiviare il DNA di bambini irrequieti, che già a cinque anni mostrano comportamenti «violenti e antisociali» perché potrebbero in futuro diventare soggetti pericolosi sotto il profilo criminale.
A seguito dell'iniziativa del Regno Unito, altri paesi hanno istituito archivi di profili genetici. Ricordiamo, in ordine cronologico: nel 1997 Olanda e Austria; nel 1998 Germania e Slovenia; nel 1999 Finlandia e Norvegia; nel 2000 Svizzera, Danimarca, Svezia, Bulgaria e Croazia; nel 2001 Francia e Repubblica Ceca; nel 2002 Estonia, Lituania, Slovacchia e Belgio; nel 2003 Lettonia e Ungheria; e infine nel 2007 la Spagna. Ma database di DNA sono di imminente introduzione anche in altre nazioni europee.
Parallelamente al Regno Unito, il Department of Justice degli Stati Uniti, in un recente documento sul futuro delle applicazioni forensi del DNA, ha sostenuto l'importanza di includere l'intera popolazione statunitense nel database dell'FBI, e ha predetto che per il 2010 la polizia avrà a disposizione analizzatori manuali del DNA in grado di accertare l'identità di un fermato sulla base di saliva o di una piccolissima quantità di tessuto (come quello ottenuto da un leggero sfioramento dell'epitelio interno della bocca).
Il 27 maggio 2005 sette Stati membri dell'Unione Europea (Germania, Spagna, Francia, Austria, Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo) hanno sottoscritto il Trattato di Prüm – che l'Italia ha sottoscritto nel 2006 – allo scopo di creare (ove non esista) un database di profili di DNA e rendere operativa a livello europeo una rete di condivisione delle banche dati del DNA per rafforzare la cooperazione di polizia in materia di lotta al terrorismo, alla criminalità organizzata transfrontaliera e all'immigrazione clandestina.
La cooperazione è attuata mediante lo scambio di informazioni relative ai dati del DNA (attraverso consultazione diretta da parte delle forze di polizia), delle impronte digitali e dell'immatricolazione dei veicoli. I dati del DNA possono essere scambiati solo per indagini giudiziarie penali, e al solo scopo di contrastare terrorismo, criminalità transfrontaliera e migrazione illegale. Grazie a una simile raccolta centralizzata, in grado di memorizzare e confrontare a livello internazionale i profili genetici, sarà possibile riconoscere in modo rapido e certo le connessioni di una data circostanza, identificare gli autori di un reato o escludere persone ingiustamente sospettate.
Finora però la convenzione non ha trovato riscontro su vasta scala: al momento sembra sia stato effettuato un unico scambio di dati tra Germania e Austria.

NESSUNO ESCLUSO. Anche al primo ministro Tony Blair, alla fine del 1999, è stato prelevato un campione di saliva per ricavarne il profilo genetico, da inserire nella banca dati nazionale britannica. Il Regno Unito è stato il primo paese ad adottarne una.

Sean Dempsey,WPA pool/AP Photo/La Presse

CRONOLOGIA

1901
Primo uso delle impronte digitali

1980
White e Wyman descrivono i polimorfismi genetici RFLP

1985
Jeffreys scopre i polimorfismi chiamati VNTR
Prima pubblicazione sulla PCR

1988
l'FBI comincia a usare la prova del DNA

1991
Prima pubblicazione sugli STR

1995
Nel Regno Unito nasce il primo database di profili di DNA

1998
L'FBI adotta il sistema CODIS

2003
Completato il sequenziamento del genoma umano

2005
Avvio del progetto HAPMAP

2012
1000 Genomes Project

si farmaci personalizzati. La conoscenza del nostro genoma ci permetterà di conoscere la nostra predisposizione a malattie quali tumori, Alzheimer, patologie cardiovascolari, diabete.

Di recente sono nate società come 23andMe, Genelex, Genovations, Complete Genomics, che dall'analisi di poche cellule contenute nella saliva promettono di rivelare agli utenti informazioni relative alla predisposizione genetica a varie malattie. Va precisato che, a eccezione di pochissime patologie, è prematuro vantare una simile capacità di previsione. Vi sono poi studi che propongono correlazioni spesso sorprendenti tra tratti genetici e caratteristiche comportamentali.

Scienziati del Karolinska Institut di Stoccolma hanno stimato che gli individui che hanno una certa variante genetica dell'allele RS3334 restino più spesso scapoli o abbiano una maggiore propensione ad avere relazioni extraconiugali e crisi matrimoniali rispetto a chi ha altre sequenze genetiche. In un altro studio, un gruppo di ricerca israeliano ha affermato di aver identificato il gene responsabile dell'avarizia. Lo studio è stato condotto su circa 200 persone che hanno fornito campioni del loro DNA. A questi è stato chiesto di donare a loro piacere parte di una somma di denaro. Chi aveva una specifica variante del gene *AVPR1a* (il gene della vasopressina) in media donava quasi il 50 per cento in più di chi ne erano privo. Di recente lo stesso gene è stato indicato come coinvolto nell'attitudine alla danza e al comportamento autistico.

La varietà dei risultati, con le contraddizioni che talora ne emergono, fa nascere il sospetto che nessuna correlazione sia vera e che sia necessario stimare meglio la probabilità di ottenere falsi positivi. Ma, al di là del campo medico, l'analisi del DNA è sempre più usata per applicazioni forensi, ed è la metodologia più accurata per l'identificazione personale (casi giudiziari, identificazione di DNA degradato in disastri di massa, attacchi terroristici, investigazioni storiche) e familiare (riconoscimento di paternità e familiarità controversa, filiazione incestuosa e così via). I biologi molecolari riescono a esaminare campioni minuscoli, antichissimi e/o degradati (si pensi al sequenziamento del DNA dell'uomo di Neanderthal per capire le caratteristiche morfologiche e fisiche di questa specie estinta e il tipo di rapporto di parentela che la lega a *Homo sapiens*).

Ma le innovazioni della scienza forense non si limitano all'esame del DNA umano. La botanica forense è spesso in grado di stabilire il luogo di provenienza di residui vegetali o polline trovati sugli abiti di una vittima o su un imputato. E inoltre i test genetici sono usati sia al fine di tutelare la salute pubblica nelle investigazioni di frodi alimentari sia al fine di tutelare gli interessi dei consumatori garantendo l'affidamento di questi nella genuinità, integrità, purezza dei prodotti alimentari. Lo studio del DNA costituisce inoltre un utile strumento legale per conservare e valorizzare il patrimonio biologico e individuare il commercio di specie protette o vietate.

Database genetici a uso forense

Nonostante i progressi nella rapidità di sequenziamento e il concomitante abbattimento dei costi, la strada per arrivare a costruire consistenti database di interi genomi individuali – che infine porterà alla bioinformatica clinica, che si occuperà di organizzare e gestire database in cui i dati clinici saranno integrati con quelli genetici – è ancora lunga. Attualmente sono in fase di costituzione, soprattutto in paesi del Nord Europa, come la Svezia, complesse «biobanche» che conterranno e integreranno database genetici e database clinici. A differenza di queste, i database di profili genetici a uso forense a scopo identificativo sono molto più semplici.

Per creare un profilo di DNA a fini identificativi si devono analizzare specifici segmenti (da 10 a 17) di DNA non codificante – ossia che non viene tradotto in RNA e proteine, e quindi non ha espressione nel fenotipo, cioè nelle caratteristiche corporee dell'individuo – detti STR (*Short Tandem Repeat*). Queste regioni sono sufficientemente variabili nella popolazione, perciò la probabilità che due persone condividano la stessa serie di STR è praticamente nulla. Ogni STR può essere codificato da una coppia di valori numerici (uno per cromosoma).

La tecnica della reazione a catena della polimerasi permette di analizzare il DNA a partire da campioni costituiti da una sola cellula (qualora il DNA genomico sia troppo scarso o degradato si può usare il DNA mitocondriale, soprattutto nelle «regioni ipervariabili», due brevi segmenti di DNA ad altissima variabilità nella popolazione). Per questo motivo l'uso degli STR può essere eseguito su una vasta varietà di materiali: dai mozziconi di sigarette ai chewing gum, dai campioni di feci, urine e tessuti ai proiettili, fino a corpi in decomposizione o carbonizzati. Un recente studio ha mostrato che è possibile analizzare il profilo genetico di una persona anche mescolato a 200 tracce appartenenti ad altrettante persone diverse. Nel caso in cui gli alleli identificati in una macchia di sangue non siano identici a quelli di una persona, anche un solo STR può portare all'esclusione di quella persona dalla lista dei sospetti. Al contrario, di rado l'identificazione di una combinazione di alleli con un sistema a singola STR è una prova conclusiva di identità.

I metodi adottati per l'identificazione sono diversi da paese a paese. Il sistema CODIS (*Combined DNA Index System*), usato negli Stati Uniti e in Canada, consiste nel confronto di 13 marcatori nucleari del tipo STR. Di ciascun marker è riportata la posizione cromosomica e il numero identificativo di GenBank, il database genetico dei National Institutes of Health (il sito web http://www.cstl.nist.gov/div831/strbase/fbicore.htm contiene informazioni sugli alleli più comuni). Il sistema verrà presto sostituito con il Next Generation CODIS (NGCODIS) che consentirà l'archiviazione di un numero maggiore di profili (miliardi di dati identificativi).

In Germania si usano loci STR qualitativamente incompatibili con il CODIS, che non è adottato neppure in Francia, Paesi Bassi e Regno Unito. Il database nazionale britannico si basa su 10 coppie di STR. L'Interpol ne raccomanda un minimo di sei,

GLI AUTORI

LUCIA BIANCHI è avvocato presso l'Ordine degli avvocati di Firenze. Pur conducendo attività professionale di avvocato (ha conseguito un master in diritto di impresa ed è conciliatore camerale societario), da alcuni anni si occupa di bioetica e genetica forense collaborando con l'Università di Cambridge e lo University College di Londra.
PIETRO LIÒ insegna bioinformatica all'Università di Cambridge, dove dirige un gruppo di ricerca in bioinformatica e biologia computazionale. Tra i suoi interessi scientifici c'è lo studio degli aspetti bioinformatici ed evoluzionistici di epidemie (HIV e influenza).

La situazione italiana

Il 4 luglio 2006 l'Italia ha sottoscritto il Trattato di Prüm per lo scambio dei dati, ma non aveva ufficialmente alcuna banca nazionale di dati del DNA, sebbene dal 1998 si fosse susseguita una serie di Disegni di Legge in tal senso.
Nel 2007 il governo Prodi ha di nuovo provato a istituire una banca dati nazionale del DNA per la «tipizzazione del profilo del DNA e la conservazione dei campioni biologici dal quale vengono estratti i profili». Il 18 luglio 2008 il governo Berlusconi ha annunciato l'introduzione del prelievo coattivo del DNA e l'istituzione di una banca dati sostanzialmente identica a quella del precedente governo.
L'articolo 55 del Codice sulla Privacy non sancisce il divieto di creazione di banche di dati genetici o biometrici, ma richiede il rispetto di particolari cautele, misure e accorgimenti a garanzia degli interessati. La normativa vigente in tema di prelievi coattivi a fini identificativi è frammentaria, disorganica e insoddisfacente. La Legge 115/2005 sul terrorismo internazionale ha introdotto l'art. 349-2bis del Codice di procedura penale sul prelievo di capelli o saliva a scopi identificativi (anche genetici), ma rientrano nel contesto anche l'art. 11 del Decreto Legislativo n. 59, 21/3/1978, l'art. 354 cpp relativo agli accertamenti urgenti sulle persone che presentano un collegamento materiale con la scena del crimine, l'art.11 della Legge n. 354, 26/7/1975, relativo agli esami effettuati al detenuto all'ingresso nell'istituto penitenziario.
A oggi in Italia non è stata data attuazione concreta alla creazione della banca dati DNA e manca una regolamentazione organica e standard operativi chiari che indichino criteri etici chiari in grado di garantire il rispetto dei concorrenti diritti di riservatezza, libertà e pubblica sicurezza. Il ritardo è dovuto a molteplici motivi: scrupoli etici e culturali, problemi correlati al prelievo biologico coattivo (dopo la sentenza n. 238/1996 della Corte Costituzionale) e copertura finanziaria.
Si stima che i costi per istituire i laboratori di biologia molecolare, un centro per la conservazione dei reperti, il sistema informatico necessario e per pagare i biologi che prelevino e trattino il DNA ammontino a 12 milioni di euro per il primo anno e poi a 6-7 milioni di euro all'anno per il suo funzionamento.

Alessandro Di Meo/Ansa

Le informazioni su di noi possono essere estrapolate dall'analisi probabilistica del genoma dei nostri familiari

ma si ritiene che l'informazione in esse contenuta non basti per distinguere senza incertezza persone diverse, pertanto si aumenta il numero di STR per aumentare il potere di risoluzione: con 13 la probabilità che due individui distinti (gemelli identici a parte) abbiano lo stesso profilo è di circa 1 su 10^{18}.

Più numerosi sono i profili inseriti in un database, maggiore è la probabilità che si identifichi il colpevole. Lo statistico Peter Donnelly, dell'Università di Oxford, ha osservato che se la ricerca in database venisse fatta sull'intera popolazione mondiale, un'unica corrispondenza di tutti i loci STR potrebbe indicare la certezza di colpevolezza, a prescindere da errori di laboratorio. L'identificazione tramite database è importante, perché non solo identifica un sospetto ma elimina dalla lista tutti gli altri individui presenti nel database.

Dalla genetica alla genomica

A fronte dei progressi nelle biotecnologie, in genetica e nelle scienze a essa collegate, ci sono problemi economici, sociali, politici, culturali, etici di grande delicatezza, importanza e interdisciplinarità, che sono ben lungi dall'essere stati risolti.

In un mondo di comunicazione informatica globale, concomitante con la vertiginosa accelerazione del progresso scientifico e l'ascesa del terrorismo internazionale, gli Stati europei non potranno esimersi dal creare banche di DNA, incentivando la collaborazione tra i rispettivi sistemi di sicurezza. Ma è auspicabile che a questa spinta collaborativa corrisponda una comune sensibilità per l'introduzione di adeguati sistemi di sicurezza nella gestione dei dati personali, in grado di assicurare la riservatezza delle informazioni acquisite, in modo da non mettere a repentaglio i diritti e le libertà fondamentali dei singoli, che potrebbero vedere i loro dati comunicati a paesi che non garantiscono un livello di protezione adeguato. Purtroppo, invece, per il momento a livello europeo manca un quadro giuridico armonizzato per la protezione dei dati personali.

Il rispetto dei dati sensibili contenuti nelle banche dati pubbliche e private non appare ancora percepito come un diritto inviolabile, meritevole di tutela costituzionale. In Italia la creazione e la conservazione di una banca dati del DNA, la tutela della privacy di dati così sensibili e della genuinità e trasparenza degli stessi dà luogo a riflessioni giuridiche che coinvolgono diritti e libertà fondamentali dei cittadini. L'abuso o l'uso improprio, distorto o arbitrario dei campioni genetici aprirebbe scenari inquietanti. Dal DNA si può risalire a una molteplicità di informazioni su una persona, compresa la sua storia familiare. Pur essendo unico (a eccezione dei gemelli omozigoti), il patrimonio genetico individuale è infatti il risultato della combinazione del patrimonio genetico materno e paterno.

C'è una correlazione tra segmenti di DNA vicini, un legame chiamato *linkage disequilibrium*. Più vicini sono due segmenti di DNA, maggiore è la correlazione, più facilmente saranno trasmessi insieme nella storia familiare e più difficilmente le informazioni paterne e materne risulteranno mescolate tra i due segmenti vicini. Queste considerazioni valgono a maggior ragione oggi che la ricerca scientifica si muove dalla genetica alla genomica, ossia sta passando dall'analisi di geni considerati singolarmente a quella dell'intero genoma di una persona.

L'analisi forense viene effettuata solo su un piccolo numero di loci STR, ed è usata esclusivamente per scopi identificativi. Per esempio il marcatore Codis VWA è situato all'interno del gene associato con la malattia di Willebrand, ma studi recenti mostrano che l'uso forense non consente di predire la malattia. In futuro, quando il sequenziamento dell'intero genoma di una persona diventerà un'operazione di routine – da effettuarsi già alla nascita per individuare la suscettibilità a specifiche patologie – l'uso improprio o illecito di dati sensibili, in grado di fornire informazioni mediche, potrebbe avere un effetto devastante.

Se conosciamo una porzione abbastanza grande del nostro genoma, dallo studio del linkage disequilibrium della popolazione umana o del gruppo etnico cui apparteniamo possiamo predire con una certa probabilità anche altre porzioni di genoma vicine a quella sequenziata. Ammesso che volessimo mantenere segreti i nostri profili genetici e genomici personali, molte informazioni potrebbero essere estrapolate dall'analisi probabilistica del genoma dei nostri familiari. Così si potrebbero usare i dati di un presunto colpevole per risalire all'intero gruppo familiare, trasferendo il sospetto su altri componenti della famiglia.

I dati genetici aumentano notevolmente le categorie di classificazione degli individui. Ne consegue che dai dati archiviati in una banca del DNA – contrariamente a ciò che accade con altre tecnologie biometriche usate nell'analisi forense, come le impronte digitali e il riconoscimento dell'iride – si possono trarre informazioni relative a soggetti diversi da quelli cui i dati si riferiscono. In via indiretta è infatti possibile avere informazioni su tutta la loro linea ascendente, discendente e collaterale. L'identificazione di Saddam Hussein, per esempio, avvenne grazie al DNA dei figli. Da ciò consegue la necessità di una legge chiara e rigorosa.

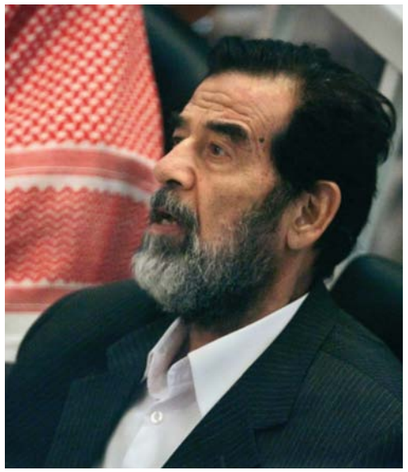
È certo che il sequenziamento di genomi completi rivestirà un ruolo determinante per la medicina personalizzata in relazione alla consanguineità e alla genetica delle popolazioni, e permetterà di risolvere questioni di privacy relativa ai consanguinei. Per esempio apporterà un contributo scientifico risolutivo alla questione legata al riconoscimento di paternità nel caso di gemelli monozigoti. In questo caso i genomi sono inizialmente identici, salvo eventuali mutazioni avvenute a seguito della divisione embrionale. Altre mutazioni si accumulano poi successivamente, durante l'invecchiamento (mutazioni somatiche), a causa di fattori ambientali o per effetti epigenetici.

David Parker/SPL/Grazia Neri; Karen Kasmauski/Corbis (*in basso*)

ANTICHE MIGRAZIONI. Uno studioso indiano preleva il sangue agli abitanti di un villaggio per studiare la provenienza delle popolazioni del Subcontinente. Il consorzio HAPMAP sta sequenziando il genoma di 1000 persone appartenenti a diversi gruppi etnici per stabilire la variabilità genetica umana e tracciare una mappa più precisa delle antiche migrazioni. A fronte, un tecnico del RIS, il raggruppamento investigativo scientifico dei Carabinieri, esamina un mozzicone di sigaretta per cercare materiale biologico utile alle indagini. In Italia, però, non è ancora stata istituita una banca dati genetica.

Il punto sulle leggi sulla privacy genetica

La prima legge sulla privacy genetica è stata approvata nel 1989 in California, a seguito del lancio del Progetto Genoma Umano. Successivamente negli Stati Uniti sono state introdotte un centinaio di leggi in materia, ma solo il 21 maggio 2008 George W. Bush ha trasformato in legge lo US Genetic Information Nondiscrimination Act (GINA), che è la prima e unica legge federale per la tutela dalle discriminazioni operate sulla base di informazioni genetiche (che predicono il rischio di patologie) da parte di assicurazioni sanitarie e datori di lavoro. GINA è il primo importante passo per la tutela dell'informazione genomica come un aspetto inalienabile e fondamentale della dignità e della privacy del singolo, delle sue radici, della sua storia genetica.
È una legge di grande importanza, in particolare negli Stati Uniti, dove le assicurazioni pagano le spese mediche, e potrebbero verificarsi casi di lavoratori licenziati o che avrebbero difficoltà a stipulare una polizza assicurativa a causa di test che rivelino il rischio di patologie genetiche invalidanti. Ancora, dati genetici male interpretati, in possesso delle compagnie assicurative o dei datori di lavoro, potrebbero dar vita a un'ingiusta discriminazione.
In Europa il problema della discriminazione genetica comincia a essere avvertito, anche se appare meno inquietante e minaccioso rispetto agli Stati Uniti, considerata la prevalenza di sistemi sanitari e previdenziali pubblici. Oggi le leggi di protezione europee dei dati personali iniziano a porre attenzione alla privacy dei dati genetici, come enfatizzato dall'«Article 29 Working Party» (che deriva il suo nome dall'art. 29 della Direttiva europea sulla privacy 95/46/EC). Tuttavia gli Stati membri non hanno ancora adottato un quadro giuridico armonizzato per la protezione dei dati personali, e questa lacuna è destinata a ripercuotersi sul livello di tutela garantito ai cittadini.



Ben Curtis/AP Photo/La Presse

Amel Emric/AP Photo/La Presse

RICONOSCIMENTO FAMILIARE. Molte informazioni su una persona possono essere ricavate anche dal DNA di un suo congiunto. Saddam Hussein, per esempio, è stato identificato grazie al DNA dei figli. Sotto, un gruppo di patologi forensi bosniaci cerca campioni da una sepoltura di massa per poter restituire ai parenti i resti delle vittime del massacro di Srebrenica. Il fatto di poter ricavare dati genetici relativi a un individuo dal genoma dei suoi parenti pone tuttavia seri problemi di privacy.

Gli attuali test di DNA forense non riescono a distinguere chiaramente il patrimonio genetico di due gemelli monozigoti. E questo potrebbe rappresentare un problema rilevante nelle cause di riconoscimento di paternità. Come è già accaduto nel caso giudiziario *Adams vs Miller and Miller*, discusso dalla Corte d'Appello del Missouri nel 2007. Holly Marie Adams testimoniò che aveva avuto due relazioni, durante lo stesso mese, con Raymon Miller e con il suo gemello identico Richard. Con la nascita di una bambina, Holly Marie si rivolse al tribunale per determinare l'identità del padre naturale e ottenere una dichiarazione di paternità. Il test genetico ordinato dal tribunale determinò che la probabilità era identica per ciascuno dei due gemelli. Nel caso di gemelli omozigoti, infatti, non ci sono attualmente test genetici commerciali in grado di fornire risposte scientificamente certe nelle cause di riconoscimento di paternità.

In futuro, sequenziare il genoma completo dei gemelli porterà a scoprire ogni mutazione verificatasi dopo che l'embrione si è diviso in due. La genomica darà un contributo risolutivo alla soluzione di casi giudiziari di questo genere.

Importanti saranno anche le sue implicazioni sul piano privatistico e pubblicistico. A proposito del primo: come si tutelerà Caio da un investigatore privato che raccolga suoi campioni biologici per ottenerne una copia del suo genoma da consegnare a un cliente che vuole conoscere la sua suscettibilità a malattie come il morbo di Alzheimer, allergie alimentari, intolleranze chimiche?

Nella sfera pubblica saranno sempre più rilevanti i problemi che si porranno ai governi in tema di sicurezza di banche di dati genomici così sensibili, a fronte del pericolo di penetrabilità delle banche dati, della privacy, della segretezza relativamente alla lettura o al rilascio dei dati a soggetti non autorizzati, delle regole di autorizzazione dell'accesso ai dati, dell'integrità del database riguardo eventuali attacchi ai dati e della modifica non autorizzata. I governi sono e saranno sempre più costretti a fare i conti con problemi di privacy genetica, circa il diritto del singolo individuo di decidere quali delle proprie informazioni genetiche possano essere conosciute da altri.

L'auspicio è che all'introduzione di nuove, importanti tecniche e test genomici faccia riscontro l'esistenza di fondamentali valori etici, onde evitare situazioni di violazione o privazione dei diritti e assicurare la necessaria sicurezza, privacy e trasparenza nella gestione dei database genetici e genomici. In assenza di valori etici condivisi e norme giuridiche armonizzate, la tutela di dati così sensibili e il rispetto dei diritti umani saranno seriamente e gravemente compromessi.

È necessario alzare i livelli di attenzione e dibattito sul modo più rigoroso di costruzione, gestione e sicurezza dei database genetici

Questioni controverse

Serve davvero un database del DNA? Stando alle motivazioni addotte per la sua istituzione, la banca dati può rivelarsi decisiva nell'individuare autori di reati e facilitare la collaborazione tra polizie anche in ottica antiterrorismo (come previsto dal Trattato di Prüm). I fautori della banca ne ribadiscono l'opportunità e l'efficacia per la pubblica sicurezza nazionale e internazionale: per scoprire autori di reati rimasti ignoti, per rintracciare persone scomparse, per stabilire l'identità di persone decedute.

Tuttavia, poiché dal DNA si può risalire a una molteplicità di informazioni relative a un individuo, la creazione di una banca dati non può compromettere il diritto dei cittadini alla tutela dei loro dati personali. L'esigenza di alzare i livelli di attenzione circa l'uso dei dati genetici inseriti nelle banche del DNA in relazione alla tutela della privacy è forte. Numerosi e complessi sono stati i problemi posti in ambito giuridico. Tra questi: quale materiale conservare? I campioni biologici – «considerata la particolare delicatezza e natura dei dati genetici, che riguardano peraltro non solo l'individuo, ma il suo intero gruppo biologico» – o le più anonime sequenze alfanumeriche, quelle che il Disegno di Legge chiama il «profilo del DNA»? Perché conservare campioni biologici da cui un giorno si potrebbero ottenere informazioni ulteriori rispetto a quelle di mera identificazione? E ancora: le regioni non codificanti sono davvero tali o lo sono solo nella misura in cui non siamo ancora riusciti a decifrarle? Che accadrà se in futuro fosse possibile dedurne informazioni genetiche caratterizzanti? Come arginare il rischio, temibile, di una schedatura di massa? A oggi sono già state redatte numerose statistiche sulle caratteristiche genetiche di intere popolazioni per razza, inclinazioni sessuali e intelligenza.

Inoltre se la pubblica sicurezza disporrà nei prossimi dieci anni di lettori di DNA da usare sul campo (come è nelle promesse della polizia statunitense), dovrà esserci la possibilità di monitorare quali informazioni verranno lette e da chi. Quali strumenti giuridici apprestare per scongiurare o punire l'uso deviato dei dati genetici da parte delle forze dell'ordine? Come sarà possibile raggiungere e garantire un buon compromesso tra la tutela dei diritti, delle libertà fondamentali delle persone e il rafforzamento delle tecniche di indagine?

Spesso il Diritto è condannato a inseguire la tecnologia e ad arrivare dopo che un problema si è posto nel contesto socio-giuridico-politico. Nell'attesa che il rispetto dei dati sensibili e personali contenuti nelle banche dati pubbliche e private inizi a essere percepito come un diritto inviolabile, meritevole di tutela costituzionale, resta urgente definire in modo dettagliato i criteri per la tutela della privacy dei dati personali (anche prevedendo un sistema di cifratura). È necessario alzare i livelli di attenzione e dibattito sul modo più rigoroso e trasparente di costruzione, gestione e sicurezza dei database e sulle implicazioni legate alla gestione, alla conservazione, all'archiviazione dei profili genetici in relazione alla tutela dei fondamentali diritti umani e alla privacy genetica. È altresì necessario ricercare un consenso comune a livello europeo nel complesso bilanciamento tra le opposte esigenze di privacy genetica e libertà individuale, da un lato, e sicurezza sociale dall'altro. ■

Letture

Forensic Genomics: kin privacy, driftnets and other open questions. Stajano F., Bianchi L., Liò P. e Korff D., «ACM Proceedings», WPES Workshop on Privacy in the Electronic Society, 2008.

Forensic DNA and Bioinformatics. Bianchi L. e Liò P., in «Briefings in Bioinformatics», Vol. 8, n. 2, pp. 117-128, 2007.

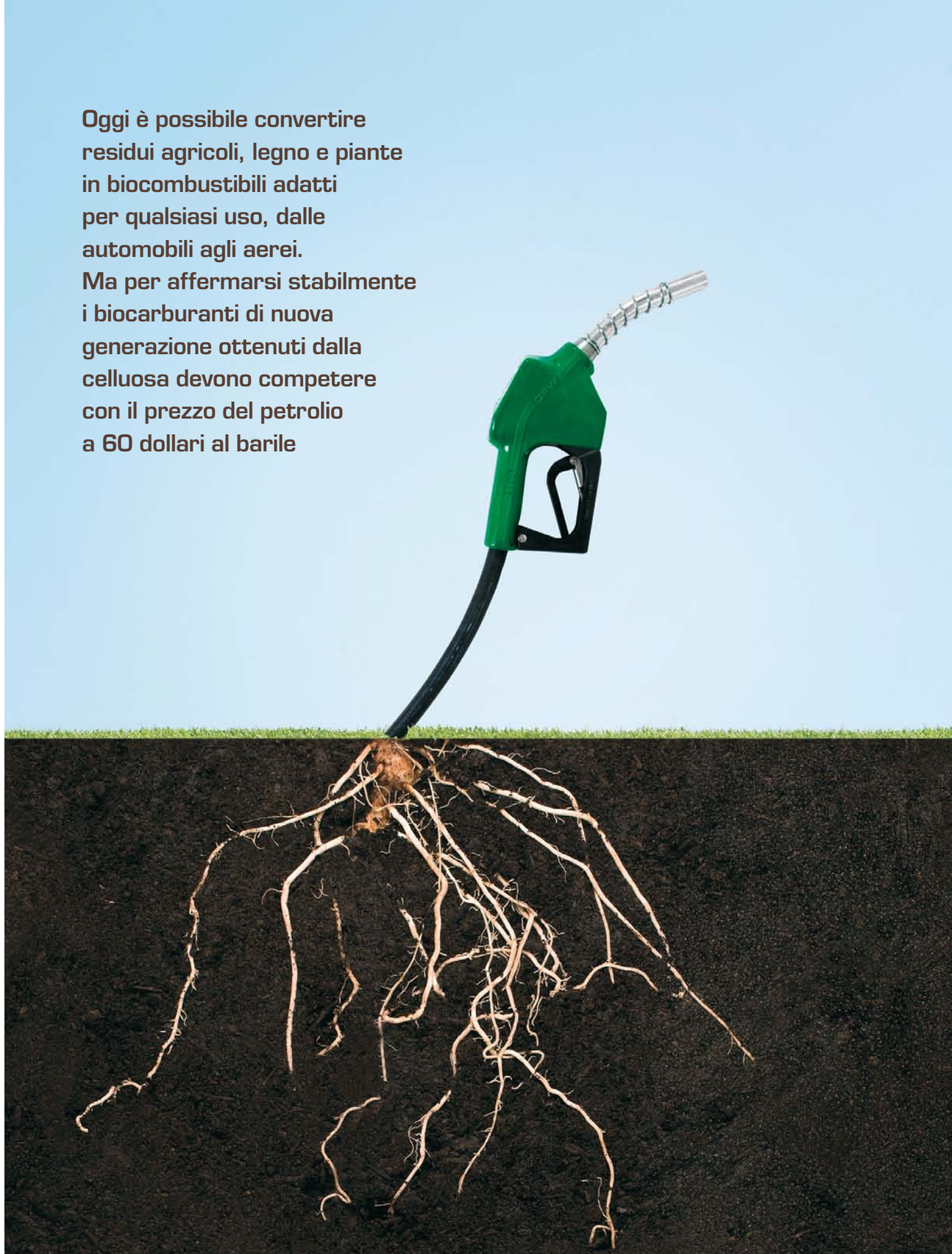
The $100 Genome. Singer E., in «Technology Review», 17 aprile 2008. **http://www.technologyreview.com/Biotech/20640/page1.**

US House Passes Genetic Discrimination Bill. «GenomeWeb Daily News», New York, 1° maggio 2008.

Biocarburanti al distributore

Oggi è possibile convertire residui agricoli, legno e piante in biocombustibili adatti per qualsiasi uso, dalle automobili agli aerei. Ma per affermarsi stabilmente i biocarburanti di nuova generazione ottenuti dalla celluosa devono competere con il prezzo del petrolio a 60 dollari al barile

di George Huber e Bruce Dale



Getty Images

Ormai dovrebbe essere chiaro che gli Stati Uniti devono liberarsi dal petrolio. Non possiamo più permetterci i rischi che la dipendenza dal greggio pone alla sicurezza nazionale, all'economia e all'ambiente. Tuttavia la civiltà non ha nessuna intenzione di fermarsi, quindi è necessario trovare un altro modo per far muovere i tanti veicoli che circolano per il mondo. A breve termine, i biocarburanti prodotti dalla cellulosa, cioè combustibili liquidi ottenuti dalle parti non commestibili delle piante, sono l'alternativa al petrolio più interessante dal punto di vista ambientale e più facile da realizzare dal punto di vista tecnologico.

I biocarburanti si producono da qualunque cosa sia, o sia stata in passato, una pianta. Quelli di prima generazione derivano da biomasse commestibili, soprattutto mais e soia (negli Stati Uniti) e canna da zucchero (in Brasile). Si tratta dei frutti appesi ai rami più bassi della grande foresta dei biocarburanti, dato che la tecnologia per convertire queste materie prime è già disponibile (oggi negli Stati Uniti ci sono 180 raffinerie che convertono mais in etanolo). Però i biocarburanti di prima generazione non sono una soluzione a lungo termine. Non c'è abbastanza terreno coltivabile per soddisfare con questi biocarburanti più del 10 per cento del fabbisogno di carburanti liquidi dei paesi sviluppati. L'incremento della domanda fa salire i prezzi dei mangimi per animali e quindi rende alcuni alimenti più costosi, sebbene non ai livelli prospettati lo scorso anno dai mezzi di comunicazione. E se facessimo i conti delle emissioni dovute a coltivazione, raccolta e trattamento industriale del mais scopriremmo che i biocarburanti di prima generazione non sono così innocui per l'ambiente come ci piacerebbe che fossero.

I biocarburanti di seconda generazione derivati da materiale cellulosico e indicati come *grassoline* (da *grass*, erba, e *gasoline*, benzina) possono aggirare i problemi appena elencati. Questi biocarburanti si producono da decine, se non centinaia, di materiali: dai residui legnosi come segatura e rifiuti edili agli scarti agricoli come i tutoli di mais e la paglia di frumento, fino alle cosiddette «colture energetiche», cioè piante erbacee e materiali legnosi a crescita rapida coltivati per essere convertiti in carburanti liquidi (*si veda il box a p. 103*). Si tratta di materiali poco costosi, tra 10 e 40 dollari per l'equivalente energetico di un barile di petrolio, abbondanti e che non interferiscono con la produzione alimentare. La maggior parte delle colture energetiche cresce su terreni non usati in agricoltura. Alcune, come le colture di salice a breve rotazione, decontaminano durante la crescita i suoli inquinati da acque reflue o metalli pesanti.

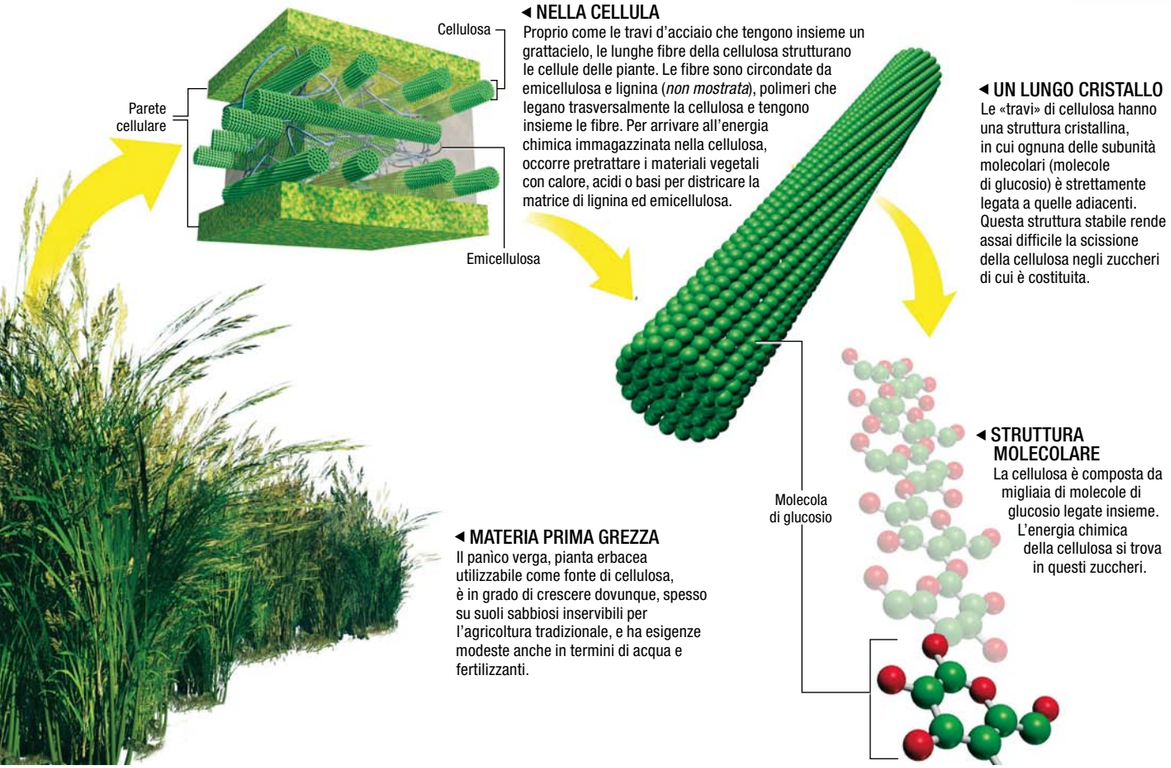
Gli Stati Uniti possono contare su un'enorme quantità di biomassa cellulosica che si può raccogliere in modo sostenibile e usare per produrre combustibili. Secondo uno studio condotto dal Department of Agriculture e dal Department of Energy, ogni anno si potrebbero ottenere quasi 1,3 miliardi di tonnellate di biomasse cellulosiche secche senza intaccare i quantitativi di biomasse disponibili per alimenti, mangimi animali ed esportazioni. Da tutta questa biomassa si produrrebbero almeno 378 miliardi di litri di combustibili all'anno, circa la metà dell'attuale consumo di benzina e gasolio de-

IN SINTESI

- I biocarburanti di seconda generazione, prodotti dalle parti non commestibili delle piante, sono la migliore alternativa al petrolio dal punto di vista ambientale e la più promettente dal punto di vista tecnologico.
- Questi nuovi carburanti saranno prodotti soprattutto da residui agricoli, come tutoli di mais, piante erbacee coltivate a fini energetici e scarti legnosi.
- Negli Stati Uniti è possibile coltivare questo genere di materie prime in quantità sufficiente a sostituire la metà degli attuali consumi di petrolio, senza però intaccare la disponibilità di prodotti alimentari.

Impalcature di cellulosa

In natura, la cellulosa sostiene lo sviluppo verticale della pianta e ha una struttura molecolare cristallina, rigida e al tempo stesso resistente alla decomposizione. Queste caratteristiche conferiscono alla pianta rigidità e resistenza, ma ne rendono difficile la conversione in combustibili fruibili.



◄ NELLA CELLULA
Proprio come le travi d'acciaio che tengono insieme un grattacielo, le lunghe fibre della cellulosa strutturano le cellule delle piante. Le fibre sono circondate da emicellulosa e lignina (*non mostrata*), polimeri che legano trasversalmente la cellulosa e tengono insieme le fibre. Per arrivare all'energia chimica immagazzinata nella cellulosa, occorre pretrattare i materiali vegetali con calore, acidi o basi per districare la matrice di lignina ed emicellulosa.

◄ UN LUNGO CRISTALLO
Le «travi» di cellulosa hanno una struttura cristallina, in cui ognuna delle subunità molecolari (molecole di glucosio) è strettamente legata a quelle adiacenti. Questa struttura stabile rende assai difficile la scissione della cellulosa negli zuccheri di cui è costituita.

◄ STRUTTURA MOLECOLARE
La cellulosa è composta da migliaia di molecole di glucosio legate insieme. L'energia chimica della cellulosa si trova in questi zuccheri.

◄ MATERIA PRIMA GREZZA
Il panico verga, pianta erbacea utilizzabile come fonte di cellulosa, è in grado di crescere dovunque, spesso su suoli sabbiosi inservibili per l'agricoltura tradizionale, e ha esigenze modeste anche in termini di acqua e fertilizzanti.

Don Foley

gli Stati Uniti (*si veda il grafico in basso a sinistra a p. 103*). Analoghe proiezioni stimano che il contenuto energetico equivalente della biomassa cellulosica disponibile globalmente sia compreso tra 34 e 160 miliardi di barili di petrolio all'anno, cioè valori superiori rispetto all'attuale consumo mondiale annuo di greggio, pari a 30 miliardi di barili. Inoltre le biomasse cellulosiche vengono convertite in ogni tipo di combustibile: etanolo, benzina, gasolio e persino carburante per gli aerei.

Per ora gli scienziati sono più bravi a far fermentare i chicchi di mais che a degradare i gambi di cellulosa, ma di recente hanno ottenuto progressi importanti. Strumenti potenti, come i modelli di chimica quantistica, consentono di realizzare strutture che controllano le reazioni a livello dei singoli atomi. Le ricerche tengono d'occhio anche la possibilità di una rapida applicazione delle tecnologie di conversione a vere e proprie raffinerie industriali. Sebbene sia un campo ancora giovane, sono già attivi diversi impianti dimostrativi, e si prevede che le prime raffinerie commerciali saranno completate entro il 2011. Presto l'epoca dei distributori dove fare il pieno di biocombustibili di seconda generazione potrebbe essere a portata di mano.

Energia imprigionata

La colpa è dell'evoluzione. La natura ha inventato la cellulosa per dare una struttura alle piante. Si tratta di un materiale con un'intelaiatura rigida, composta di molecole incastrate tra loro, che fornisce alle piante il sostegno necessario per crescere in verticale (*si veda il box in alto*) e che resiste ostinatamente alla degradazione biologica. Per liberare l'energia che c'è dentro la cellulosa, si deve innanzitutto sciogliere questo nodo molecolare prodotto dall'evoluzione.

In generale, questo processo prevede come primo passo la destrutturazione della biomassa solida in molecole più piccole, poi la raffinazione di questi prodotti fino a ottenere i combustibili. Gli ingegneri classificano i metodi di destrutturazione in base alla temperatura. I metodi a bassa temperatura (tra 50 e 200 gradi Celsius) producono zuccheri che si fanno fermentare per produrre etanolo e altri combustibili, in modo simile a quanto si fa con il mais e le colture saccarifere. La destrutturazione a temperature più alte (400-600 gradi) produce un bio-petrolio che viene raffinato per ottenere benzina o gasolio. La destrutturazione a temperature estremamente elevate (superiori a 700 gradi) produce gas che vengono poi convertiti in combustibili liquidi.

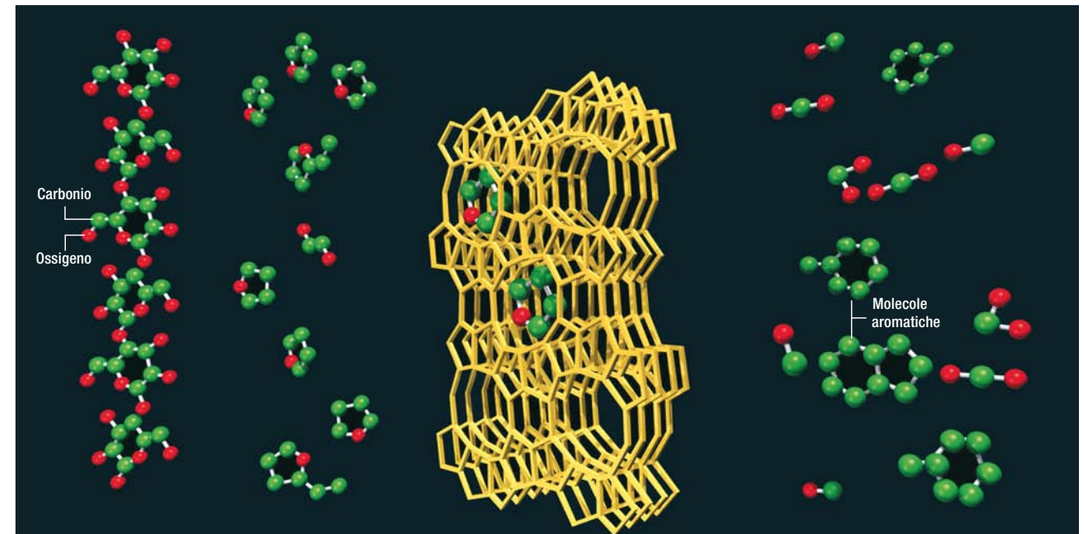
Per ora non siamo in grado di prevedere quale di questi metodi convertirà in biocombustibili liquidi la massima frazione di energia immagazzinata al costo più basso. Forse sarà necessario adottare percorsi diversi per i diversi materiali che costituiscono le biomasse cellulosiche. Per esempio, un processo ad alta temperatura potrebbe essere il più adatto per i materiali legnosi, mentre per i materiali erbacei potrebbero funzionare meglio le basse temperature.

Carburanti bollenti

Attualmente la produzione di gas di sintesi (o *syngas*) ad alta temperatura è il metodo di produzione di biocarburanti più sviluppato. Il syngas, miscela di monossido di carbonio e idrogeno, si ottiene da qualsiasi materiale contenente carbonio e poi si converte in gasolio, benzina o etanolo grazie alla sintesi di Fischer-Tropsch (FT), un processo sviluppato negli anni venti da scienziati tedeschi. Nel corso della seconda guerra mondiale il Terzo Reich lo sfruttò per produrre combustibili liquidi dalle riserve di carbone disponibili in Germania. Ancora oggi molte delle compagnie petrolifere più importanti dispongono della tecnologia per la conversione del syngas, a cui si potrebbe ricorrere se la benzina dovesse raggiungere prezzi proibitivi.

Trasformazione diretta della cellulosa in combustibile

La cellulosa è composta da atomi di carbonio, ossigeno e idrogeno (*gli atomi di idrogeno sono omessi nell'illustrazione*). La benzina invece è fatta solo di carbonio e idrogeno. Se si vuole convertire la cellulosa in biocombustibili di seconda generazione bisogna quindi eliminare l'ossigeno dalla cellulosa per produrre molecole ad alta densità energetica che contengano solo carbonio e idrogeno. Nell'approccio detto «pirolisi catalitica veloce», illustrato qui sotto, la cellulosa viene decomposta e convertita in benzina in un unico stadio.



SCISSIONE INIZIALE
La cellulosa entra nella camera di reazione ed è riscaldata a 500 gradi Celsius in meno di un secondo, in questo modo si spezza in molecole più piccole ricche di ossigeno.

IL CATALIZZATORE
Questi frammenti si adattano all'intricata struttura tridimensionale di un catalizzatore. Quest'ultimo facilita le reazioni chimiche che eliminano l'ossigeno dai frammenti della cellulosa producendo anelli di atomi di carbonio. I dettagli dei processi chimici non sono ancora ben compresi.

I PRODOTTI FINALI
Alla fine della reazione – che richiede solo qualche secondo – la cellulosa è stata trasformata nei componenti aromatici della benzina. Fra i sottoprodotti della reazione ci sono acqua (*non mostrata*), anidride carbonica e monossido di carbonio.

Don Foley

Il primo passaggio per la produzione di syngas è la gassificazione. La biomassa alimenta un reattore, in cui è riscaldata a temperature superiori a 700 gradi. Poi la si miscela con ossigeno o vapor d'acqua per produrre un gas che contiene monossido di carbonio, idrogeno e catrame. Ripulito dal catrame, il gas è portato a pressioni comprese tra 20 e 70 atmosfere e fatto fluire su un catalizzatore, cioè su un materiale solido che trattiene le molecole che devono reagire e le spinge a partecipare a determinate reazioni. I catalizzatori usati nella conversione del syngas sono stati sviluppati per convertire gas naturale e di sintesi in combustibili liquidi, ma funzionano bene anche con le biomasse.

Anche se conosciamo bene il funzionamento di questa tecnologia, il costo dei reattori è alto. Un impianto FT costruito nel 2006 nel Qatar per convertire gas naturale in 34.000 barili di carburanti liquidi al giorno è costato 1,6 miliardi di dollari. Se un impianto a biomasse avesse un costo analogo, per produrre abbastanza carburante da ripagare il capitale investito dovrebbe consumare circa 5000 tonnellate di biomassa al giorno tutti i giorni per un periodo compreso tra 15 e 30 anni. Dato che il trasporto di una quantità così ingente di biomassa pone significative difficoltà logistiche ed economiche, la ricerca sulla tecnologia del syngas studia soprattutto come ridurre i costi in conto capitale.

Bio-petrolio

Lunghe ere geologiche di alte temperature e pressioni in ambiente sotterraneo hanno convertito zooplancton e alghe del Cambriano nei campi petroliferi dei nostri giorni. Un trucco dello stesso genere, ma dai tempi molto più brevi, può servire a convertire biomasse cellulosiche in bio-petrolio. In questo caso l'impianto di raffinazione riscalda la biomassa in ambiente privo di ossigeno a una temperatura tra 300 e 600 gradi. Il calore degrada i costituenti della biomassa fino a ottenere bio-petrolio e un solido simile al carbone, e nel processo si libera anche una certa quantità di gas. Il bio-petrolio prodotto in questo modo è il biocarburante liquido più economico disponibile sul mercato. Il suo costo, in termini di equivalente energetico della benzina, è forse di 10 centesimi di euro al litro (in aggiunta al costo delle biomasse grezze).

Inoltre il processo è adatto per impianti relativamente piccoli e vicini alle aree dove si raccolgono biomasse, limitando così le spese di trasporto. Purtroppo questo greggio è altamente acido, non si miscela con i combustibili ottenuti dal petrolio e ha un contenuto energetico pari a metà di quello della benzina. Volendo, si può far andare un motore diesel alimentandolo direttamente con questo bio-greggio, ma solo se si è sicuri di non dover usare mai più quel motore.

Le raffinerie però sarebbero in grado di convertire questo bio-greggio in combustibili fruibili, e molte grandi aziende stanno studiando come adattare al nuovo compito i loro macchinari. Già oggi alcune aziende producono un altro tipo di diesel «verde», suggerendo che potrebbero trattare anche il bio-greggio cellulosico. Attualmente le raffinerie sono alimentate con una miscela di oli vegetali, grassi animali e oli combustibili derivati dal petrolio. Di recente la ConocoPhillips ha dimostrato la fattibilità di questo approccio in una raffineria di Borger, in Texas, producendo più di 45.000 litri di biodiesel da grassi bovini provenienti da un vicino impianto per la macellazione di proprietà della Tyson Foods (*si veda il box a p. 105*).

I ricercatori stanno anche studiando come far avvenire il processo a due stadi in quello che per un ingegnere chimico equivale a cucinare tutto con una sola pentola, cioè realizzando nello stesso reattore prima la conversione della biomassa in olio combustibile e poi quella dell'olio in carburante. Uno di noi (Huber) sta sviluppando un metodo denominato «pirolisi catalitica veloce». L'aggettivo «veloce» si riferisce alle modalità del riscaldamento iniziale: una volta nel reattore, la biomassa è portata a 500 gradi nel giro di un secondo: questo shock termico spezza le grandi molecole in molecole più piccole. Come le uova in un contenitore, le molecole più piccole hanno dimensioni e forma adatte per legarsi alla superficie del catalizzatore.

Una volta alloggiate nei pori del catalizzatore, le molecole partecipano a una serie di reazioni che le trasformano in benzina, più precisamente in

ENERGIA E INSETTI: le termiti sono un buon modello per le fabbriche di biocarburanti. I microrganismi che vivono nell'intestino delle termiti scindono la cellulosa in zuccheri. Gli ingegneri stanno cercando di replicare questo processo a scala industriale.

Kurt Stepnitz, Michigan State University (*Dale*); cortesia George W. Huber (*Huber*); Photo Researchers, Inc. (*termiti*)

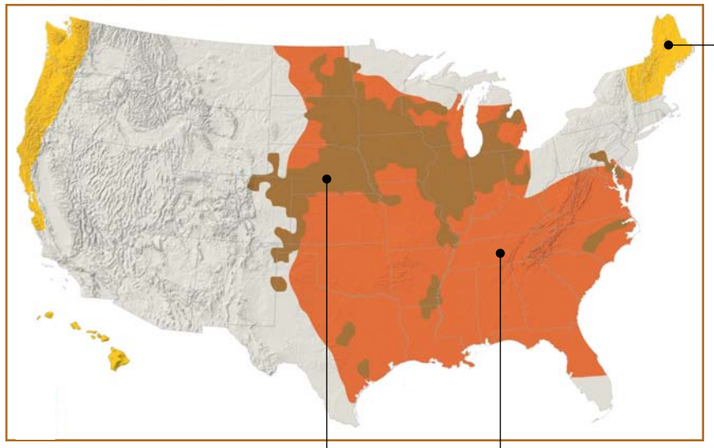
GLI AUTORI

GEORGE W. HUBER è professore di ingegneria chimica all'Università del Massachusetts ad Amherst. Nel 2003 «Scientific American» ha citato il suo lavoro sulla produzione di idrogeno da biomasse fra i 50 risultati scientifici più importanti dell'anno. Ha fondato Anellotech, start-up dedicata ai biocarburanti, ed è consulente di diverse aziende del settore. BRUCE DALE è professore ed ex direttore del Dipartimento di ingegneria chimica della Michigan State University. È uno dei responsabili del Great Lake Bioenergy Research Center (greatlakesbioenergy.org), ed è consulente di aziende che lavorano nel campo dei biocarburanti.

La cellulosa come materia prima negli Stati Uniti

Quando gli scienziati saranno in grado di convertire in modo efficiente il materiale cellulosico in carburanti, non avranno problemi di scarsità di materiali grezzi vegetali necessari ad alimentare il processo. Uno studio condotto anni fa dal Department of Agriculture e dal Department of Energy ha concluso che gli Stati Uniti possono produrre ogni anno almeno 1,3 miliardi di tonnellate di materiali cellulosici grezzi senza intaccare le esportazioni e la disponibilità di prodotti alimentari (una versione aggiornata dello studio, intitolato *The Billion Ton Vision*, sarà pubblicata in autunno). Oltre alle colture energetiche che si potrebbero far crescere in gran parte degli Stati Uniti, specialmente su terreni che non sono abbastanza fertili per le tradizionali colture alimentari, gli Stati nord-orientali e nord-occidentali potrebbero contribuire con i materiali di scarto dell'industria forestale, mentre i residui agricoli delle coltivazioni di mais e soia, come tutoli e brattee, potrebbero fornire energia a gran parte del Midwest.

TERRE FERTILI PER BIOCARBURANTI

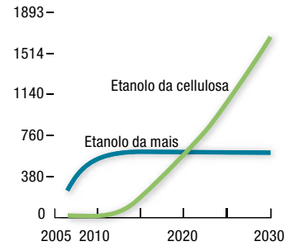


PRODOTTI FORESTALI
I materiali legnosi possono provenire da due fonti principali: i residui attualmente scartati da settori industriali come quelli del legname e della carta e l'eccesso di alberi di piccolo diametro, che secondo il Servizio forestale degli Stati Uniti andrebbero eliminati per migliorare la salute delle foreste.

RESIDUI AGRICOLI
Steli, foglie e scarti delle pannocchie costituiscono circa la metà della resa totale delle colture agricole. Una parte di questi residui deve essere lasciata sul terreno per ripristinare i suoli, ma oggi la maggior parte di essi finisce fra i rifiuti.

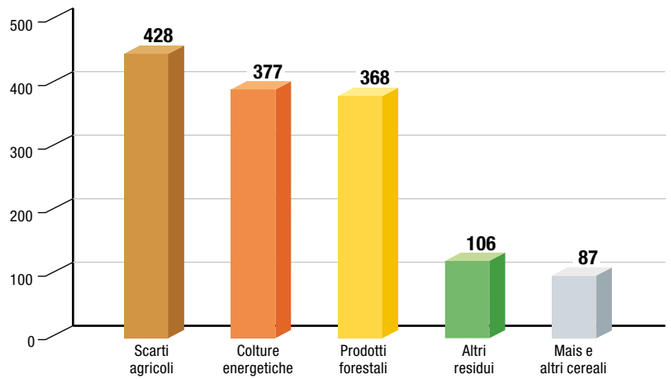
COLTURE ENERGETICHE
Queste piante sono in grado di crescere rapidamente, e hanno esigenze minime in fatto di acqua e fertilizzanti. Fra gli esempi più comuni ci sono il panico verga, il sorgo, il miscanthus e alcune varietà o ibridi di canna. Alcune colture, come quelle di salice a corta rotazione, non solo possono crescere su suoli contaminati da acque di scarico o metalli pesanti, ma riescono anche a ripulirli durante la crescita.

ETANOLO CHE GLI STATI UNITI POSSONO PRODURRE
(miliardi di litri)

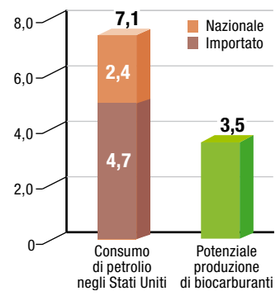


Uno studio pubblicato quest'anno dai Sandia National Laboratories dimostra che gli Stati Uniti hanno quasi raggiunto il massimo della capacità produttiva di etanolo da mais. Mentre il quantitativo di etanolo prodotto dalla cellulosa può crescere ancora per vari decenni.

QUANTITÀ DI MATERIA PRIMA PER BIOCARBURANTI CHE SI PUÒ PRODURRE IN MODO SOSTENIBILE NEGLI STATI UNITI (milioni di tonnellate)



CONSUMO DI PETROLIO E PRODUZIONE DI BIOCARBURANTI
(miliardi di barili di petrolio equivalenti)

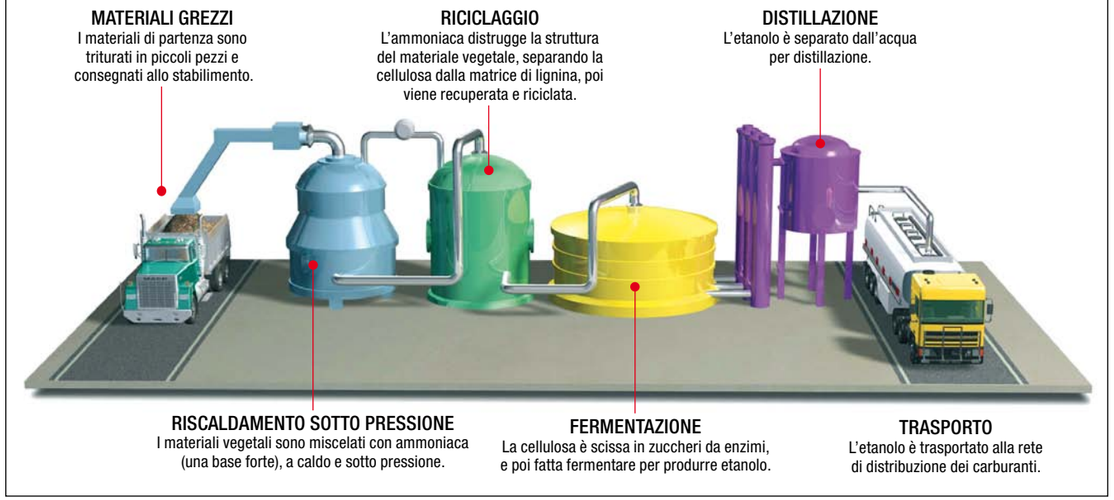


La produzione potenziale di biocarburanti equivale al massimo storico della produzione di petrolio, toccato nel 1970.

Laurie Grace; Vast Photography/Getty Images (*tutoli di mais*); Wally Eberhart/Getty Images (*panico verga*); Peter Essick/Getty Images (*foresta*)

Degradazione della cellulosa con ammoniaca

I pretrattamenti delle fibre vegetali che attaccano la cellulosa sono molti: quelli menzionati più spesso sono gli acidi e il calore. Il processo AFEX (espansione delle fibre mediante ammoniaca) combina in modo unico basso consumo di energia, basso costo ed efficienza elevata.



una componente di alto valore della benzina, quella aromatica, che aumenta il numero di ottano (*si veda il box a p. 101*). (I carburanti ad alto numero di ottano permettono ai motori di funzionare a pressioni interne più elevate, aumentandone l'efficienza.) L'intero processo richiede solo dieci secondi. Già oggi la Anellotech, una *start-up* di New York, sta cercando di trasferire questo processo dal laboratorio al livello industriale, e prevede di mettere in funzione un impianto commerciale entro il 2014.

Una soluzione zuccherosa

Per ora il procedimento che ha attirato la maggior parte degli investimenti pubblici e privati si basa su un meccanismo più tradizionale: prima si liberano gli zuccheri delle piante, poi per fermentazione si ottengono etanolo e altri biocombustibili. Gli scienziati hanno studiato diversi metodi con cui spezzare due sostanze resistenti come cellulosa ed emicellulosa – cioè le fibre che legano fra loro le molecole di cellulosa (*si veda il box a p. 100*) – negli zuccheri di cui sono composte. Le biomasse vengono riscaldate, irradiate con raggi gamma, triturate fino a ridurle in poltiglia o sottoposte all'azione del vapore ad alta temperatura. Vengono trattate con acidi o basi concentrati, o immerse in solventi. Addirittura, grazie all'ingegneria genetica, si ottengono microrganismi che degradano la cellulosa.

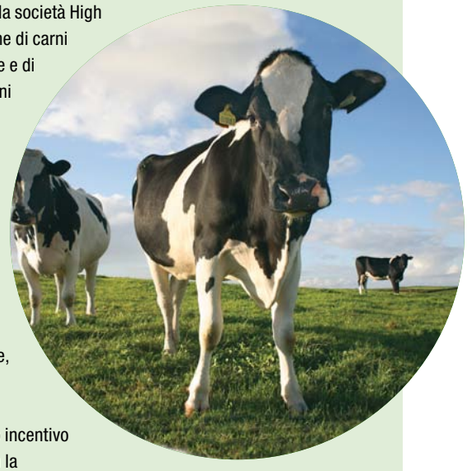
Purtroppo molte tecniche che funzionano in laboratorio non hanno la minima possibilità di affermarsi nella pratica commerciale. Per essere valido commercialmente, un procedimento di pretrattamento deve generare zuccheri facilmente fermentabili con alte rese e concentrazioni, e deve poter essere adottato con investimenti modesti. Il procedimento non dovrebbe usare materiali tossici e non dovrebbe richiedere troppa energia. Inoltre deve produrre biocarburanti a un prezzo competitivo con quello della benzina ricavata dal petrolio.

Gli approcci più promettenti sottopongono la biomassa a condizioni estreme di pH e temperatura. Nel laboratorio di uno di noi (Dale) si sta sviluppando una strategia che usa una base forte: l'ammoniaca. In questo procedimento di espansione delle fibre (indicato con la sigla AFEX), la biomassa cellulosica è riscaldata a 100 gradi con ammoniaca concentrata sotto pressione. Riducendo la pressione, l'ammoniaca evapora e viene riciclata. Poi alcuni enzimi convertono almeno il 90 per cento di cellulosa ed emicellulosa in zuccheri. La resa è elevata anche perché questo metodo minimizza la degradazione degli zuccheri che spesso si verifica in ambiente acido o ad alta temperatura. AFEX è un processo «da secco a secco»: la biomassa iniziale è un solido secco e dopo il trattamento rimane secca e non diluita con acqua. In questo modo viene converte in grandi quantità di etanolo altamente concentrato e ad alta gradazione.

Il processo AFEX inoltre è potenzialmente molto economico: secondo un'analisi recente, ammettendo che la consegna di una tonnellata di biomassa all'impianto costi 50 dollari, il pretrattamento AFEX, combinato con un processo di fermentazione avanzato detto *consolidated bioprocessing* (CBP), produce etanolo a un costo, in termini di equivalente energetico della benzina, di circa 20 centesimi di euro al litro, che probabilmente consente un prezzo alla pompa inferiore a 40 centesimi al litro.

Don Foley

Materie grasse per combustibili



L'ultima novità: sacrificare vitelli grassi (e altri animali) per farne carburanti liquidi. Ad aprile la società High Plains Bioenergy ha aperto una bioraffineria nelle vicinanze di un impianto per la lavorazione di carni suine a Guymon, in Oklahoma. La raffineria parte dal grasso di maiale, sottoprodotto abbondante e di scarso valore ottenuto nel processo di macellazione industriale, per convertirlo, insieme ad alcuni oli vegetali, in biocarburanti per motori diesel. Secondo i programmi, lo stabilimento dovrebbe convertire ogni anno circa 113 milioni di litri di strutto in 113 milioni di litri di gasolio.
Nel 2010 all'impianto della High Plains se ne affiancherà un altro costruito a Geismar, in Louisiana, e gestito dalla Dynamic Fuels, una joint venture costituita fra il gruppo alimentare Tyson Foods e la società Syntroleum, che opera nel campo dell'energia. Lo stabilimento userà i grassi derivati dagli impianti di lavorazione del pollame e delle carni bovine e suine della Tyson per ottenere ogni anno oltre 280 milioni di litri di biocarburanti per motori diesel e aerei. Negli ultimi tempi l'industria dei biocarburanti per motori diesel ha però subito duri colpi, e molti impianti restano inattivi a causa del ristagno della domanda. Il basso prezzo del petrolio ha reso il gasolio ricavato dal petrolio meno costoso rispetto a quello ottenuto da fonti biologiche, che negli Stati Uniti in genere è ottenuto da olio di soia e altri oli vegetali. Per attutire il colpo ci sono voluti gli sgravi fiscali del governo federale – un dollaro per gallone (3,785 litri) – che però dureranno solo fino alla fine di quest'anno. Alcuni produttori temono che la scomparsa di questo incentivo possa causare la fine delle loro aziende. In precedenza la Tyson aveva raggiunto un accordo con la ConocoPhillips per produrre biocarburanti per motori diesel in una raffineria della ConocoPhillips già attiva in Texas, a Borger; ma viste le incertezze sul rinnovo degli incentivi fiscali per ora il progetto è congelato.

Peter Cade/Getty Images

Il costo del cambiamento

Il costo determinerà la velocità con cui crescerà l'uso di biocarburanti cellulosici. Il principale concorrente è il petrolio, e l'industria petrolifera sta beneficiando di oltre un secolo di programmi di ricerca. Inoltre la maggior parte delle raffinerie ha già ripagato il capitale investito. Le raffinerie di biocarburanti di seconda generazione richiederanno invece investimenti per centinaia di milioni di dollari, un costo che ricadrà sul prezzo dei prodotti.

Tuttavia i biocarburanti cellulosici godono di vantaggi importanti rispetto ai carburanti ricavati dal petrolio e da altre fonti, come le sabbie bituminose e la liquefazione del carbone. Innanzitutto, le materie prime sono meno costose del petrolio. Quando il settore avrà superato le fasi iniziali, questa caratteristica dovrebbe tenere bassi i costi. Poi i biocarburanti verranno prodotti negli Stati Uniti, con relativi benefici in termini di sicurezza nazionale. E sono molto meglio per l'ambiente rispetto alle alternative basate su combustibili fossili.

In più, nuovi strumenti di analisi e modelli permetteranno la costruzione di impianti di raffinazione più efficienti a un tasso irraggiungibile solo dieci anni fa. Stiamo conoscendo in modo sempre più approfondito e sempre più velocemente le proprietà delle materie prime con cui alimentiamo i reattori e i processi per convertirle in carburanti. Il sostegno del Governo statunitense alla ricerca sulle energie alternative dovrebbe contribuire ad accelerare ulteriormente questi sviluppi. I finanziamenti approvati dal presidente Obama per stimolare l'economia prevedono anche 800 milioni di dollari per il Biomass Program del Department of Energy, che da parte sua accelererà la ricerca e lo sviluppo di biocarburanti e finanzierà progetti per bioraffinerie a scala commerciale. I finanziamenti del governo prevedono inoltre sei miliardi di dollari di crediti agevolati per i «progetti di avanguardia nel campo dei biocarburanti» la cui costruzione abbia inizio entro ottobre del 2011.

Se gli Stati Uniti manterranno l'attuale livello di impegno, le difficoltà riguardanti logistica e tecnologia di conversione dovrebbero essere superate di slancio. Nei prossimi 5-15 anni, le tecnologie di conversione delle biomasse usciranno dai laboratori e arriveranno sul mercato, e il numero di veicoli alimentati da biocarburanti ricavati da cellulosa aumenterà notevolmente. Questo passaggio potrebbe cambiare il mondo. Ed è un passaggio che andava realizzato già da tempo. ■

➡ Letture

Breaking the Chemical and Engineering Barriers to Lignocellulosic Biofuels. L'agenda di ricerca proposta dal Workshop *Biomass to Biofuels*, disponibile sul sito Internet **www.ecs.umass.edu/biofuels.**

Development of Cellulosic Biofuels. Registrazione video di una lezione di Chris Somerville, direttore dell'Energy Biosciences Institute della Università della California a Berkeley: **http://tinyurl.com/grassoline.**

Sito web del Biomass Program del Department of Energy degli Stati Uniti: **http://eere.energy.gov/biomass.**

Dodici categorie per sei problemi

L'ennesimo enigma ha inizio con una misteriosa divisione tra Cambridge e Kaliningrad che Alice categorizza come preoccupante delirio

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

"Va bene, riconosco la mia sconfitta e sono pronta a sorbirmi le vostre battute. Questa stramaledetta città tedesca non riesco a trovarla. Sospetto che siate riusciti a falsificare l'atlante».

«Piano con certi termini, Treccia. Oggi il Capo si sente filosofo, e se dici "falsificare" rischiamo una tirata su Popper lunga un chilometro».

Alice allontana bruscamente il librone: i tre chili del *The Times Comprehensive Atlas of the World* oscillano pericolosamente sull'orlo del tavolo.

Rudy ferma il volume: «Non è questione di sentirsi filosofo: è mera geografia».

«Non direi» contesta Piotr. «Si tratta piuttosto di storia della geografia politica, e a ben vedere...».

«A ben vedere – interloquisce Alice – storia, filosofia e geografia non mi hanno mai fatto impazzire. Odio ammetterlo, ma vi preferisco quando litigate di matematica».

«Il guaio è che ci prendi troppo sul serio», fa Rudy mentre picchietta col cannello della pipa sull'atlante aperto su una tavola che mostra il Mar Baltico. «Ormai dovresti saperlo: se Doc e io ti facciamo insieme una domanda, deve esserci almeno una mezza fregatura. Eccola, la tua Königsberg: come vedi non è più tedesca, e non è più neppure Königsberg. Adesso si chiama Kaliningrad, ed è una città russa».

«Russa? Mi sembra fuori dai confini...».

«È un'enclave. Una volta era Prussia Orientale, poi è stata parte connessa dell'Unione Sovietica quando lo erano anche le repubbliche baltiche, ma adesso è separata dalla madrepatria. Uomini e confini sono caduchi come foglie...».

Alice guarda Piotr con una smorfia: «Vedi che ricomincia a fare il filosofo? Non lo sopporto. Che gli è successo? E dire che non mi ricordo neppure più come siamo finiti a parlare di Königsberg...».

«È la città natale di Hilbert! Forse parlavamo dei suoi 23 problemi – risponde Doc, alzando il tono di voce – o forse del celebre indovinello della passeggiata sui sette ponti della città, da fare senza passare mai due volte per lo stesso ponte».

«*Niet*», dice Rudy, stroncando i tentativi di Piotr. «Parlavamo delle categorie kantiane. Mi ricordavo che erano 12, contro le forme a priori trascendentali che sono solo due, tempo e spazio. E notavamo come Cassirer e i neokantiani, sull'onda dello spazio-tempo relativistico, avessero coraggiosamente deciso di ridurle a una sola. E Kant è di Königsberg, ed è per questo che siamo finiti con l'atlante sulla scrivania».

Alice guarda di nuovo Piotr, sempre più preoccupata «Vedi? Gli offri su un piatto d'argento un classico della topologia e tutti i 23 problemi di Hilbert, e lui che fa? Parla di appercezioni trascendentali e di noumeni. Chiamo un medico».

Il sopracciglio di Piotr si alza perplesso e segue il dito di Rudy che sfoglia l'atlante vagando tra le linee sottili di meridiani e paralleli. Giunto sulla costa nordorientale degli Stati Uniti, l'indice si ferma e riprende a tamburellare.

«Eccola. Qual è il risultato di Königsberg diviso Cambridge?».

«D'accordo, mi hai convinto», dice Piotr ad Alice. «Vada per il medico. Lo chiamo io, ne conosco uno bravo».

«Cambridge vale 2 – riprende Rudy, incurante – perché la Cambridge inglese ha il suo duplicato vicino a Boston, sull'altro lato dell'Atlantico. L'omonima consorella ospita Harvard e il MIT: città doppia, quindi vale 2. Königsberg invece vale 12 perché qui nascono le 12 categorie di Kant, o se preferite perché i 23 problemi dell'indigeno Hilbert più lo spazio-tempo dei neokantiani diviso le 2 forme a priori originarie fa sempre 12. Calcolo ineluttabile e preciso come una passeggiata del grande filosofo. Quindi Königsberg diviso Cambridge fa sei, numero perfetto e bellissimo. Che ci voleva ad arrivarci?».

«Doc, non sarebbe meglio scordarsi il medico amico e chiamare subito il 118? La cosa mi pare urgente».

«Non saprei, Treccia... Sento puzza di bruciato».

Rudy sorride attraverso la pipa. È un sorriso difficilissimo da fare, ma a lui riesce. «Sempre qui, sotto il mio dito, nella Cambridge americana, oltre ad Harvard e al MIT c'è anche il CMI».

«Il Clay Mathematics Institute? Quello dei Problemi del Millennio?».

«Già. Problemi da un milione di dollari ciascuno. Erano sette, ma dopo che Grigori Perelman ha dimostrato la congettura di Poincaré ne restano solo sei. Gran bel numero, sei. L'ho già detto?».

«Sì, l'hai detto fino a farci preoccupare».

«Allora è tempo di farvi passare la preoccupazione. Immaginate un convegno a Cambridge: quando due studiosi si incontrano, discutono tra loro sempre dello stesso problema del Millennio. Per capirci, diciamo quando A incontra B cominciano a parlare del primo PdM; ma lo stesso A, incontrando C, parla con questi sempre e solo del sesto, mentre magari B e C tra loro discuterebbero, che so, del quarto. Ora, è possibile che non si abbiano mai delle conversazioni a tre sul medesimo problema, indipendentemente da quali siano i matematici? Naturalmente questa impossibilità delle conversazioni a tre dipende dal numero dei partecipanti, ma qual è il valore massimo per cui tre matematici qualsiasi non potranno mai fare dei discorsi sensati a tre?».

Mentre Piotr fa una smorfia di disgusto, Alice comincia a lanciare saette dagli occhi.

«Sei una serpe. Tutta quella manfrina filosofica per arrivare a questo. Ti servivano sei problemi, vero? Tutta quella esa-ltazione, quella esa-gitazione che mi ha portato diritta a questo stadio di esa-sperazione... E ora citerai il teorema di Ramsey, vero? Tutto per arrivare a questa egocentrica risposta. GC, sai che sto per sfasciarti questo bell'atlante in testa?». Rudy comincia a camminare rasente alla parete, verso la porta. Guarda l'ira funesta di Alice che stringe l'atlante, e invoca Piotr per un aiuto.

«Doc, dammi una mano, fermala. Speravo ci mettesse di più, ad arrivare alla soluzione, ma proprio stavolta ci è arrivata in un baleno. Maledizione, io sarò egocentrico, ma le donne... Ah, per la barba ben rasata di Kant! Le donne sono davvero imprevedibili».

Illustrazioni di Stefano Fabbri

Il problema di agosto: l'ordine delle frittelle

Il mese scorso parlavamo di come ordinare le pile di pancake con opportuni «colpi di spatola». Una pila di N frittelle è sempre ordinabile: per $N = 1, 2$ o 3 la soluzione è evidente, mentre per i casi restanti il numero di colpi necessario è sempre compreso tra N e $2N - 3$:

- N colpi per $3 \leq N \leq 5$
- $N + 1$ colpi per $6 \leq N \leq 10$
- un numero di colpi compreso tra N e $2N - 9$ per $N > 10$.

Per contro, risistemare gli ospiti mal posizionati bastano al più due liste disgiunte di permutazioni, qualunque sia il loro numero. Al solito, rinviamo al blog per ulteriori dettagli e migliori giustificazioni: rudimatematici-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it.

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di ottobre e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.